

ADALBERTO MATOSKI

**UTILIZAÇÃO DE PÓ DE MADEIRA COM GRANULOMETRIA
CONTROLADA NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE CIMENTO-MADEIRA**

Tese apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná como requisito parcial à obtenção do título de “Doutor em Ciências Florestais”, área de concentração de tecnologia e utilização de produtos florestais.

Orientador: Prof. Dr. Setsuo Iwakiri

CURITIBA

2005

A meus filhos, cujo futuro pertence

AGRADECIMENTOS

Ao professor Setsuo Iwakiri, pela orientação e incentivo durante a execução dessa tese.

A INBRASFAMA – Indústria Brasileira de Farinha de Madeira através da colega e mestre Tatiane Baldan pelo apoio e fornecimento do material para pesquisa.

Aos colegas de curso que de uma forma ou de outra colaboraram na realização desse trabalho,

Aos funcionários Ademir Cavali, Gilnei Machado, Victor Herrera e Antônio Perin pelo apoio na confecção dos painéis e na utilização dos equipamentos do laboratório.

BIOGRAFIA

ADALBERTO MATOSKI, filho de João Amilton Matoski e Hilda Joana Narozny Matoski, nascido em Castro – PR em 11 de abril de 1954.

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Paraná em 1982.

Graduou-se como Bacharel em Estatística pela Universidade Federal do Paraná em 1989.

Concluiu curso de Pós-graduação *lato senso* (Especialização) em Métodos Numéricos na Universidade Federal do Paraná em 1984.

Concluiu o ciclo de estudos da Associação dos Diplomados da Escola Superior de Guerra no ano de 1984.

Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina no ano de 1998 cujo título da dissertação foi: “Efeitos deletérios dos cloretos em reservatórios de concreto”.

Em 2003 iniciou seu curso de doutorado na Universidade Federal do Paraná na área de concentração Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

Atuou como Engenheiro Civil em diversas empresas do estado do Paraná e como Analista de Sistemas, Organização e Métodos em companhias de seguros.

Professor efetivo no Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná desde fevereiro de 1993.

Coordenador do curso de Engenharia de Produção Civil no CEFET-PR a partir de maio de 2003.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS	XIII
RESUMO	XIV
ABSTRACT	XV
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa	3
1.2 Objetivos	4
2 REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1 Compósitos	8
2.1.1 <i>Painéis cimento madeira</i>	11
2.1.2 <i>Tipos de painéis</i>	13
2.1.3 <i>Vantagens e desvantagens dos painéis cimento madeira</i>	15
2.1.4 <i>Outros compósitos minerais</i>	17
2.1.5 <i>Compatibilidade entre o cimento e a madeira</i>	20
2.1.6 <i>Granulometria</i>	22
2.1.7 <i>Fabricação dos painéis cimento-madeira</i>	23
2.2 Componentes	27
2.2.1 <i>O Cimento Portland</i>	27
2.2.2 <i>A madeira</i>	38
2.2.3 <i>A água</i>	48
2.2.4 <i>Aditivos</i>	54
3 MATERIAIS E MÉTODOS	60
3.1 Materiais utilizados	60
3.1.1 <i>O pó de madeira</i>	60
3.1.2 <i>O cimento</i>	62
3.1.3 <i>A água</i>	62
3.1.4 <i>Aditivos químicos</i>	63
3.2 Preparação do compósito	63
3.2.1 <i>Confecção dos corpos de prova cilíndricos</i>	63
3.2.2 <i>Comparação entre procedimentos</i>	65
3.2.3 <i>Confecção dos painéis</i>	67
3.3 - <i>Análise dos corpos de prova cilíndricos</i>	72

3.3.1	<i>Análise das propriedades físicas</i>	72
3.3.2	<i>Ensaio de resistência à compressão axial</i>	73
3.3.3	<i>Estudo da relação madeira cimento</i>	74
3.4	Análise dos Painéis.....	75
3.4.1	<i>Delineamento experimental</i>	75
3.4.2	<i>Propriedades dos painéis</i>	76
3.4.3	<i>Análise estatística</i>	78
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
4.1	Estudo da granulometria	80
4.1.1	<i>Módulo de finura</i>	80
4.1.2	<i>Curva granulométrica</i>	81
4.2	Análise dos procedimentos	82
4.3	O fator água-cimento	83
4.3.1	<i>A resistência em função do fator água cimento</i>	84
4.3.2	<i>A variação da densidade</i>	86
4.3.3	<i>A variação da trabalhabilidade</i>	88
4.3.4	<i>A variação do teor de madeira</i>	89
4.4	Propriedades dos painéis.....	94
4.4.1	<i>Análise da densidade dos painéis</i>	94
4.4.2	<i>Análise da absorção de água dos painéis</i>	96
4.4.3	<i>Comportamento do inchamento em espessura dos painéis</i>	100
4.4.4	<i>Comportamento do MOR e MOE na compressão</i>	104
4.4.5	<i>Comportamento do MOR e MOE na flexão estática</i>	115
4.4.6	<i>Ligação interna</i>	124
4.4.7	<i>Mistura de aditivos</i>	129
4.4.8	<i>Comportamento da variação da relação madeira/cimento</i>	130
4.4.9	<i>Resultados do tratamento em câmara climatizada</i>	131
4.4.10	<i>Análise econômica dos painéis</i>	133
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	137
	REFERÊNCIAS	139
	ANEXOS.....	148

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - FLUXO ANUAL GLOBAL DA MADEIRA	6
FIGURA 2 – ELEMENTOS BÁSICOS DA MADEIRA	9
FIGURA 3 – BENEFÍCIOS DOS CONSTITUINTES NA FABRICAÇÃO DOS COMPÓSITOS	12
FIGURA 4 – RELAÇÃO ENTRE DENSIDADE E COMPRESSÃO MÁXIMA.....	15
FIGURA 5 – DESCRIÇÃO ESQUEMÁTICA DA DEGRADAÇÃO DA FIBRA DE SISAL	16
FIGURA 6 – VARIAÇÃO DO MÓDULO DE RUPTURA COM O CONTEÚDO DE FIBRA AOS 28 DIAS. .	18
FIGURA 7 – FLUXO DE CALOR E TEMPO DE HIDRATAÇÃO PARA COMPÓSITOS E CIMENTO	21
FIGURA 8 – EFEITO DO TRATAMENTO DADO ÀS PARTÍCULAS PARA TRÊS ESPÉCIES –	21
FIGURA 9 – SISTEMA DE FABRICAÇÃO DE PAINEL CIMENTO-MADEIRA.....	26
FIGURA 10 - EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA DO CIMENTO	29
FIGURA 11 – RELAÇÃO DO TIPO DE CIMENTO E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	37
FIGURA 12 – RELAÇÃO ENTRE TEOR DE FIBRAS E RESISTÊNCIA À FLEXÃO	40
FIGURA 13 – CURVA GRANULOMÉTRICA	41
FIGURA 14 – RELAÇÃO ENTRE O FATOR CIMENTO MADEIRA E A DENSIDADE	42
FIGURA 15 – RELAÇÃO ENTRE O TEOR CIMENTO-MADEIRA E A COMPRESSÃO.....	43
FIGURA 16 – MOLÉCULA DE CELULOSE	44
FIGURA 17 – EXTRATIVOS NA MADEIRA	46
FIGURA 18 – DISTRIBUIÇÃO DOS CONSTITUINTES ATRAVÉS DA PAREDE CELULAR	47
FIGURA 19 – RELAÇÃO SUPERFÍCIE ESPECÍFICA & DEMANDA DE ÁGUA.....	49
FIGURA 20 – RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA E O FATOR ÁGUA CIMENTO.....	50
FIGURA 21 – RELAÇÃO ENTRE A MASSA ESPECÍFICA E A RESISTÊNCIA.....	50
FIGURA 22– RESISTÊNCIA DO CONCRETO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE CURA A VAPOR. .	52
FIGURA 23 – EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA CARACTERIZAR A GRANULOMETRIA.....	61
FIGURA 24 – FLUXOGRAMA DOS PROCEDIMENTOS PARA MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA .	66
FIGURA 25 – EQUIPAMENTO DE HOMOGENEIZAÇÃO DA MISTURA.....	67
FIGURA 26 – MOLDAGEM DO COMPÓSITO EM CILINDROS METÁLICOS.....	67
FIGURA 27 – EQUIPAMENTO PARA Prensagem de Painéis.....	70
FIGURA 28 – DETALHE DA CÂMARA DE CLIMATIZAÇÃO	71
FIGURA 29 – ESQUEMA DO ENSAIO DE TRABALHABILIDADE	73
FIGURA 30 – DELINEAMENTO: ESTUDO DAS GRANULOMETRIAS E FATOR A/C.....	74

FIGURA 31 – DELINEAMENTO PARA O ESTUDO DE GRANULOMETRIAS E ADITIVOS	75
FIGURA 32 – DISTRIBUIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA, PARA O CORTE.....	77
FIGURA 33 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO PÓ DE MADEIRA.....	81
FIGURA 35 – RELAÇÃO ENTRE O FATOR ÁGUA CIMENTO E A RESISTÊNCIA.....	84
FIGURA 36 – RELAÇÃO ENTRE DENSIDADE E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	86
FIGURA 37 – RELAÇÃO ENTRE DENSIDADE E FATOR ÁGUA-CIMENTO.....	87
FIGURA 38 – RELAÇÃO ENTRE TRABALHABILIDADE E TENSÃO-	88
FIGURA 39 – RELAÇÃO ENTRE TRABALHABILIDADE E FATOR ÁGUA-CIMENTO	89
FIGURA 40 – RELAÇÃO ENTRE TEOR DE MADEIRA E A TENSÃO À COMPRESSÃO.....	90
FIGURA 41 – RELAÇÃO ENTRE TEOR DE PÓ E A DENSIDADE	92
FIGURA 42 – RELAÇÃO ENTRE A DENSIDADE E A TENSÃO À COMPRESSÃO.....	93
FIGURA 43– GRÁFICO DOS RESÍDUOS TENSÃO X DENSIDADE.....	93
FIGURA 44 – DENSIDADE EM FUNÇÃO DO ADITIVO UTILIZADO.....	95
FIGURA 45 – VARIAÇÃO DA DENSIDADE EM FUNÇÃO DA GRANULOMETRIA	95
FIGURA 46 – ABSORÇÃO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DO TIPO DE ADITIVO.....	97
FIGURA 47 – ABSORÇÃO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DA GRANULOMETRIA.....	99
FIGURA 48 – ABSORÇÃO D'ÁGUA (24 HS) EM FUNÇÃO DA GRANULOMÉTRIA E DO ADITIVO	100
FIGURA 49 –VARIAÇÃO DO MÓDULO DE RUPTURA EM FUNÇÃO DA GRANULOMETRIA.....	105
FIGURA 50 – RELAÇÃO DO MÓDULO DE RUPTURA COM OS ADITIVOS E GRANULOMETRIAS ...	107
FIGURA 51 - VALORES MÉDIOS PARA O MÓDULO DE RUPTURA COM SIGNIFICÂNCIA DE 95% .	108
FIGURA 52 –MOE PARA OS DIVERSOS TIPOS DE GRANULOMETRIA.	111
FIGURA 53 – RELAÇÃO ENTRE DENSIDADE E MOR.....	112
FIGURA 54 – RELAÇÃO ENTRE DENSIDADE E MOE	113
FIGURA 55 - RELAÇÃO MOR X GRANULOMETRIA X ADITIVO NA COMPRESSÃO.....	114
FIGURA 56 – RELAÇÃO MOE X GRANULOMETRIA X ADITIVO NA COMPRESSÃO	114
FIGURA 57 – VALORES DO MODULO DE RUPTURA NA FLEXÃO PARA CADA ADITIVO	118
FIGURA 58 – VALORES MÉDIOS COM INTERVALO DE 95%	118
FIGURA 59 – RELAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE E OS TIPOS DE ADITIVOS	121
FIGURA 60 – RELAÇÃO ENTRE DENSIDADE E O MÓDULO DE RUPTURA	122
FIGURA 61 – RELAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE E A DENSIDADE.....	123
FIGURA 62 – RELAÇÃO ENTRE O MOR X GRANULOMETRIA X ADITIVO NA FLEXÃO.....	123
FIGURA 63 – RELAÇÃO: MOE X GRANULOMETRIA X ADITIVO NA FLEXÃO.	124
FIGURA 64 – VALORES MÉDIOS DA LIGAÇÃO INTERNA EM FUNÇÃO DOS ADITIVOS	126
FIGURA 65 – VALORES MÉDIOS DA LIGAÇÃO INTERNA EM FUNÇÃO DA GRANULOMETRIA	127

FIGURA 66 – LIGAÇÃO INTERNA PARA ADITIVOS EM FUNÇÃO DA GRANULOMETRIA.....	128
FIGURA 67 – LIGAÇÃO INTERNA EM FUNÇÃO DA GRANULOIMETRIA E ADITIVOS	128
FIGURA 68 – RELAÇÃO CUSTOS X ADITIVOS X GRANULOMETRIAS	135

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – MATERIAIS CONSUMIDOS NA CONSTRUÇÃO E O CONSUMO DE ENERGIA.....	7
TABELA 2 - CLASSIFICAÇÃO DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA	10
TABELA 3 – PROPRIEDADES DO COMPÓSITO DO TIPO "EXCELSIOR"	13
TABELA 4 – COMPONENTES DO CIMENTO CP V ARI	37
TABELA 5 – CARACTERÍSTICAS DO CIMENTO ARI	38
TABELA 6 – EXEMPLO DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	41
TABELA 7 – COMPONENTES DA MADEIRA.....	43
TABELA 8 – COMPARAÇÃO ENTRE A CELULOSE E A HEMICELULOSE.....	45
TABELA 9 – CONSUMO DE TORAS DE PINUS NO BRASIL (2001).....	48
TABELA 10 – CLASSIFICAÇÃO DOS ADITIVOS USANDO O CRITÉRIO DA SOLUBILIDADE.....	54
TABELA 11 – EFEITO DE ADITIVOS QUÍMICOS NO TEMPO DE PEGA DO CIMENTO.	57
TABELA 12 – EFEITO DOS ADITIVOS NA PEGA DO CIMENTO EM COMPÓSITOS	57
TABELA 13 – CARACTERÍSTICAS OBTIDAS NO EMPREGO DE ADITIVOS A BASE DE CLORO.	58
TABELA 14 – QUANTIDADE DE MATERIAL PARA COMPOSIÇÃO DOS PAINÉIS.....	68
TABELA 15 – EXEMPLO DA COMPARAÇÃO MÚLTIPLA DE MÉDIAS	79
TABELA 16 – MÓDULO DE FINURA	80
TABELA 17 - TENSÃO MÉDIA EM FUNÇÃO DO PROCEDIMENTO	83
TABELA 18 – RELAÇÃO ENTRE O FATOR ÁGUA-CIMENTO E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO ...	85
TABELA 19 – VALORES MÉDIOS DA DENSIDADE DOS CORPOS DE PROVA.....	86
TABELA 20– VALORES MÉDIOS DA TRABALHABILIDADE	88
TABELA 21 – RELAÇÃO DO TEOR DE MADEIRA E A TENSÃO À COMPRESSÃO	90
TABELA 22 – RELAÇÃO TEOR DE MADEIRA & DENSIDADE APARENTE	91
TABELA 23 – VALORES DA DENSIDADE EM FUNÇÃO DA GRANULOMETRIA.....	94
TABELA 24 - RESULTADO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DO ADITIVO (2 HORAS).....	96
TABELA 25 - RESULTADO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DA GRANULOMETRIA	98
TABELA 26 - VALORES MÉDIOS PARA O INCHAMENTO EM ESPESSURA (2 HORAS)	101
TABELA 27 - VALORES MÉDIOS PARA O INCHAMENTO EM ESPESSURA (2 HORAS)	102
TABELA 28 - VALORES MÉDIOS PARA O INCHAMENTO EM ESPESSURA (24 HORAS)	102
TABELA 29 - VALORES MÉDIOS PARA O INCHAMENTO EM ESPESSURA (24 HORAS)	103
TABELA 30 - EFEITO DOS ADITIVOS SOBRE O MÓDULO DE RUPTURA (KGF/CM ²)	104
TABELA 31 - EFEITO DOS ADITIVOS SOBRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE	106
TABELA 32 – EFEITO DA GRANULOMETRIA SOBRE O MÓDULO DE RUPTURA (KGF/CM ²).....	109
TABELA 33 – EFEITO DA GRANULOMETRIA SOBRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE (KGF/CM ²)	110

TABELA 34 – EFEITO DOS ADITIVOS SOBRE O MOR NA FLEXÃO ESTÁTICA (KGF/CM ²)	115
TABELA 35 – EFEITO DOS ADITIVOS SOBRE O MOE NA FLEXÃO ESTÁTICA (KGF/CM ²)	116
TABELA 36 – VALORES DO MOR À FLEXÃO EM FUNÇÃO DA GRANULOMETRIA. (KGF/CM ²)	119
TABELA 37 –EFEITO DA GRANULOMETRIA MÓDULO DE ELASTICIDADE (KGF/CM ²)	120
TABELA 38 – EFEITO DOS ADITIVOS SOBRE A LIGAÇÃO INTERNA (KGF/CM ²)	125
TABELA 39 – EFEITO DA GRANULOMETRIA SOBRE A LIGAÇÃO INTERNA.	126
TABELA 40 –VALORES MÉDIOS PARA MISTURA DE ADITIVOS E CLORETO DE CÁLCIO.	129
TABELA 41 – VALORES MÉDIOS PARA O PAINEL COM 25% E 36% DE PÓ DE MADEIRA.	130
TABELA 42 –MÉDIAS REFERENTES PAINEL CURADOS EM CÂMARA CLIMATIZADA.	131
TABELA 43 – VALORES MÉDIOS REFERENTES AO MÓDULO DE ELASTICIDADE	132
TABELA 44 – CUSTOS DOS COMPONENTES DO COMPÓSITO POR METRO CÚBICO	134
TABELA 45 - CUSTOS DOS COMPÓSITOS EM REAIS POR METRO CÚBICO.....	135

LISTA DE ABREVIATURAS

ASTM – American Society for Testing and materials
b – constante
C₂S – silicato dicálcico
C₃A – aluminato tricálcico
C₃S – silicato tricálcico
C₄AF – ferro aluminato tetracálcico
Ca(OH)₂ – Hidróxido de cálcio
CaO – óxido de cálcio
CaSO₄ – Sulfato de Cálcio
CO₂ – Dióxido de carbono
CPV ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial
da – densidade da água
dc – densidade do cimento
dm – densidade da madeira
Fa/c – fator água cimento
Fe₂O₃ – Oxido férrico
H – Hidrogênio
M – massa da madeira
MgO – óxido de magnésio
MOE – Módulo de elasticidade
MOR – Módulo de ruptura
N₂O₃ – Óxido nitroso
P – porosidade
S – Resistência final
S₀ – Resistência inicial
SiO₂ – silicato
SO₃ – óxido sulfuroso
TU – teor de umidade de madeira

RESUMO

Esse trabalho teve como objetivo a pesquisa de painéis de cimento-madeira utilizando pó de madeira com granulometria controlada, onde a madeira utilizada para gerar o pó vem do reaproveitamento do rejeito de indústrias madeireiras. O material utilizado foi do gênero *Pinus sp*, onde o que diferencia esse trabalho, além da granulometria dessas partículas, pois todas têm dimensões menores que 0,8 mm, é a sua origem controlada, uma vez que esse material é industrializado. O trabalho foi dividido em duas etapas distintas: a primeira etapa consistiu na execução de quatro corpos de prova cilíndricos para cada granulometria da madeira, com teor de madeira variando de 7,5 % até 25%, adensando-os apenas por vibração. Dessa forma verificou-se que as resistências obtidas com esses ensaios foram superiores às resistências obtidas por outros autores que utilizaram fibras longas ou partículas em seus corpos de prova, para os mesmos teores. A segunda etapa do experimento consistiu na fabricação de painéis de cimento madeira, utilizando quatro granulometrias distintas, todas do gênero *Pinus sp* e quatro aditivos químicos. Verificou-se que a mistura do pó de madeira com a menor granulometria obteve os piores resultados. Por outro lado os aditivos à base de cloretos tiveram um excelente comportamento fornecendo os melhores resultados. Assim a combinação do pó de madeira com granulometria maior e o aditivo a base de cloreto de cálcio foi aquela em que as propriedades tiveram seus valores melhorados. Foram utilizados neste trabalho teores de 25% e 36% de pó de madeira para a confecção dos painéis, sendo que os resultados das propriedades analisadas foram melhores para o teor de 25% tendo, no entanto, pouca diferença em relação ao teor de 36%. Testou-se também a combinação de dois aditivos, o silicato de sódio e o sulfato de alumínio para a confecção dos painéis. Verificou-se que não houve melhora significativa das propriedades analisadas. Por sua vez, a análise comparativa dos custos de fabricação dos painéis indicou que melhor opção foi a mistura do pó de madeira com a maior granulometria e o aditivo a base de cloreto de cálcio.

Palavras-chave: pó de madeira, cimento, compósitos, painéis.

ABSTRACT

This work tries to give its contribution in the research of wood-cement panels using milling wood, also known as wooden flour wood, whose origin is the use of rejects of lumber industries. The usable particulars are of the Pinus sp species, where the obtained staple fibers was relatively short and inflexible, keeping however its resistance. These staple fibers keep the original composition of the wood and in this process they did not suffer any previous treatment. This work was divided in two distinct stages: the first stage consisted of the execution of cylindrical bodies of test with text varying of 7,5 % up to 25% of flour, densifying them only by vibration. It was verified that the stress obtained with these assays had been superior to the stress obtained for other authors who had used long staple fibers in its bodies of test, for same texts, showing that the homogeneity obtained with the reduction of the size of particles has important influence. The second stage of the experiment consisted of the execution of wood cement panels, using four distinct grain sized, all of the Pinus sp species and four chemical additives. The obtained results, in the same way that the cylindrical bodies of test, had been superior to the ones found in similar researches. It was verified that the finest flour had the worse results. On the other hand the additives with chloride basis have had an excellent behavior supplying the best results. So, the combination of the thickest flour with the additives with basis calcium chloride was that in wich the properties have had their values maximized. And the last, the analysis of the manufacture costs showed the viability economic of this type of panel.

Key words: panel, wood cement, composites

1 INTRODUÇÃO

A otimização do sistema construtivo é cada vez maior em função da necessidade de se reduzir os custos e minimizar os desperdícios. Os painéis de madeira estão na classe de produtos que auxiliam a industrialização da construção civil, pois podem ser utilizados na execução de paredes, pisos e coberturas de forma modulada. Além da facilidade de sua utilização, a madeira tem um forte apelo ecológico e baixo consumo de energia.

As construções baseadas em madeira requerem um processo construtivo de baixo consumo de energia o que resulta em baixa quantidade de emissão de carbono em forma de CO₂. Essa característica assume maior importância, visto que a concentração de dióxido de carbono na atmosfera está aumentando e contribuindo com o aquecimento global. O relacionamento existente entre essas constatações se deve ao fato de que uma maior utilização da madeira como elemento construtivo, colabora com a redução das emissões.

O carbono armazenado praticamente existe somente na madeira e seus produtos. Alguns produtos contêm o carbono como, por exemplo, o aço, mas em quantidades insignificantes. A madeira contém o carbono até que seja queimada ou sofra a biodeterioração, por isso é a melhor solução a longo prazo. No entanto as florestas capturam o carbono fazendo um balanceamento dessa situação.

A fabricação de diversos materiais emite o dióxido de carbono diretamente na atmosfera devido às alterações químicas. O material cuja fabricação mais emite carbono na atmosfera é o cimento. O CO₂ emitido pelas fábricas de cimento foi de aproximadamente 200 milhões de toneladas durante o ano de 1998 (BUCHANAN e LEVINE, 1999). Nessas emissões estão incluídos os produtos derivados do concreto. Esse fato, juntamente com a queima de combustíveis fósseis leva a emissão de 5,4 bilhões de toneladas de CO₂ na atmosfera. O coeficiente de emissão de carbono de cada tipo de material depende muito do tipo de energia e sua fonte utilizada para sua fabricação. Assim por exemplo, no Brasil a maior parte da energia é gerada por hidroelétricas.

A indústria está mudando e isto está ocorrendo por meio do desenvolvimento de novos produtos, ou ainda, melhorando a qualidade dos produtos existentes e, no caso da madeira, esta mudança ocorre também através da combinação da madeira com outros materiais. Essa tendência na utilização de novos

compósitos de madeira pode ser observada no uso comum de painéis de cimento madeira em vários países do mundo.

Ainda, qualquer novo material de construção deve atender a determinados requisitos mínimos, ou seja: deve ter a facilidade de ser produzido em série; deve ser econômico; deve atender às necessidades culturais e econômicas da população a qual se destina: segurança, saúde e a satisfação de quem usa o material também devem ser atendidas.

Os painéis, de forma geral, atendem aos requisitos anteriormente citados e também atendem ao requisito velocidade de construção. A aplicação de painéis de forma modulada em obras elimina uma série de etapas, bem como as dificuldades na execução de acabamentos, conforme cita SILVA e SILVA, (2004). A precisão geométrica, a variedade de dimensões, as formas de acabamento, incorporação de revestimentos na fábrica e a facilidade na instalação de caixilhos, são outras vantagens que podem ser consideradas na utilização de painéis como elementos construtivos.

Os compósitos de cimento-madeira, feitos em painéis com partículas de madeira, satisfazem aos requisitos citados anteriormente, pois esses painéis permitem uma construção modular, o que implica em uma redução do tempo e custo da mão de obra. Também satisfazem as necessidades de segurança e saúde, pois sendo material a base de cimento, é mais resistente aos ataques por fungos e insetos do que a madeira. Ainda, o fato de serem resistentes ao fogo aumenta a sensação de segurança. O isolamento térmico e acústico proporcionado por esse tipo de painel, também deve ser considerado. (RAMIREZ CORETTI et al. 1998).

As características mecânicas facilitam a empregabilidade dos painéis de cimento madeira, pois esses painéis podem ser serrados, pregados, parafusados ou colados permitindo assim larga utilização. Essas mesmas características permitem que sejam pintados, chapiscados, rebocados e revestidos com outros tipos de materiais. A versatilidade desse material permite que o fabricante agregue valor a esses painéis na medida que em vez de brutos, eles podem ser entregues lixados ou pintados, permitindo que sejam utilizados como material de acabamento.

A elevada alcalinidade do cimento, associada às características orgânicas da madeira, pode levar a uma sensível redução da vida útil do painel de cimento madeira. As pesquisas vêm sendo realizadas em duas linhas; a primeira linha refere-se a proteção das partículas de madeira envolvendo-as em produtos químicos; a

segunda refere-se a redução da alcalinidade do meio através de tratamento químico na argamassa de cimento ou com adições. No entanto, pouco se conhece das interações químicas entre as moléculas do cimento e as moléculas das substâncias da madeira.

1.1 Justificativa

A necessidade de casas de baixo custo, especialmente aquelas direcionadas às classes de baixa renda, é reconhecida pelos governantes, que procuram direcionar sua política nesse sentido. Práticas especiais de financiamentos são direcionadas para esse alvo. Entidades de classe também participam no atendimento a essas necessidades; como exemplo desse fato pode-se citar o modelo “casa fácil” lançado pelo CREA-PR (Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia do Paraná).

Outro aspecto a ser considerado é a substituição dos painéis de fibro-cimento derivados do asbestos (ou amianto) que vem sendo banidas gradativamente em vários países do mundo. A toxicidade das chapas de cimento-amianto já foi provada e demonstrada e mesmo no Brasil em alguns estados sua utilização está sendo restringida e até proibida. O diferencial desta chapa é seu baixo custo e, sobretudo sua elevada durabilidade. Assim justifica-se mais uma vez a pesquisa na área de chapas de fibro-cimento.

A preocupação com a substituição do amianto cresce quando se verifica que o mercado brasileiro consome acima de dois milhões de toneladas/ano de fibro cimentos, principalmente na forma de telhas, conforme SAVASTANO et al. (2002), apresentou em seu trabalho.

Os compósitos com fibras de madeira e cimento fazem parte do cotidiano em muitos países do mundo, confirmando a tendência no reaproveitamento de material reciclado buscando também a economia de energia. HOLDERNESS (1994) cita em seu trabalho que a grande vantagem em sua utilização está na utilização profícua que este material permite. Cita ainda que a expressão “utilização limitada somente pela imaginação do projetista” se encaixa muito bem para os compósitos de cimento e madeira. Ressalva, contudo, que as melhores aplicações são aquelas que maximizam suas propriedades.

No Brasil as pesquisas têm sido dirigidas para o reaproveitamento de material rejeitado por outros processos produtivos. À exemplo disso pode-se citar a fibra de

sisal, a fibra de coco, a fibra da bananeira e até a fibra de couro que têm sido utilizadas nestas pesquisas.

Buscou-se na escolha do material utilizado algumas características como baixo custo, facilidade em sua utilização. Dessa forma utilizou-se o cimento de alta resistência inicial, o CP-V-ARI-RS que é um cimento utilizado comercialmente. A água utilizada foi proveniente da rede de distribuição da concessionária da cidade, pela facilidade e baixo custo em sua utilização. Finalmente, buscou-se utilizar aditivos facilmente encontrados no mercado e também de baixo custo, mas com eficiência comprovada em outros estudos conforme citado em revisão bibliográfica desse trabalho.

1.2 Objetivos

O objetivo principal desse trabalho foi pesquisar e fabricar painéis de cimento-madeira, utilizando pó de madeira com granulometria controlada e cimento de alta resistência inicial.

Os objetivos específicos foram:

- a) Avaliar a influência da granulometria nas propriedades dos painéis de cimento madeira;
- b) Determinar a melhor composição cimento/aditivos buscando melhorar suas propriedades;
- c) Avaliar suas propriedades utilizando a cura em ambiente controlado;
- d) Avaliar suas propriedades utilizando a mistura de aditivos;
- e) Avaliar suas propriedades alterando a relação madeira/cimento;
- f) Comparar o custo para a confecção desses painéis.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Na Europa, o compósito de cimento-madeira é utilizado há muito tempo, tendo sido inclusive patenteado na Alemanha em 1880 e na Áustria em 1908, conforme informação da empresa Climatex®. Como exemplo desse fato pode-se citar o estudo de DINWOODLE e PAXTON (1998), onde apresentaram resultados da avaliação da durabilidade de painéis de cimento madeira de, pelo menos, nove fabricantes de diferentes países como a França, Alemanha, Finlândia, Turquia, Suíça e Hungria. O painel de cimento madeira surgiu na Europa, como elemento construtivo, no final dos anos setenta e início dos anos oitenta. (COATES, 1994).

A questão do consumo de energia tem se tornado cada vez mais importante sob todos os aspectos e, portanto sua conservação e conseqüente uso racional é fator fundamental para o desenvolvimento do país. As construções baseadas na madeira requerem um processo com baixo consumo de energia, que resulta em baixa quantidade de emissão de carbono em forma de CO₂. Por sua vez a concentração de dióxido de carbono na atmosfera está aumentando e contribuindo com o aquecimento global.

Para considerar o efeito dos materiais de construção na emissão global do dióxido de carbono, deve-se considerar dois fatos:

- 1) o carbono armazenado;
- 2) o carbono emitido durante o processamento do material.

O carbono armazenado consiste de, somente, a madeira e seus produtos. Alguns produtos contem carbono, como o aço, mas em quantidade insignificantes. A madeira contém o carbono até que seja queimada ou sofra biodeterioração, por isso poderia ser considerado como solução paliativa a longo prazo. No entanto as florestas permitem a captura do carbono fazendo um balanceamento dessa situação.

A utilização da madeira como material de construção não deve ser considerada isoladamente para a redução do teor de dióxido de carbono na atmosfera. Existem outros produtos que também têm participação no processo. A figura 1 apresenta um sumário do fluxo dos produtos florestais. Os dados foram obtidos da FAO de acordo com BUCHANAN e LEVINE, (1999). O consumo da madeira em função de seus produtos está em torno de 3,5 bilhões de metros cúbicos,

o que resulta em torno de 0,7 m³ por pessoa por ano, aproximadamente. Os números em negrito, da figura 1 indicam o volume em bilhões metros cúbicos e os demais mostram a massa em toneladas.

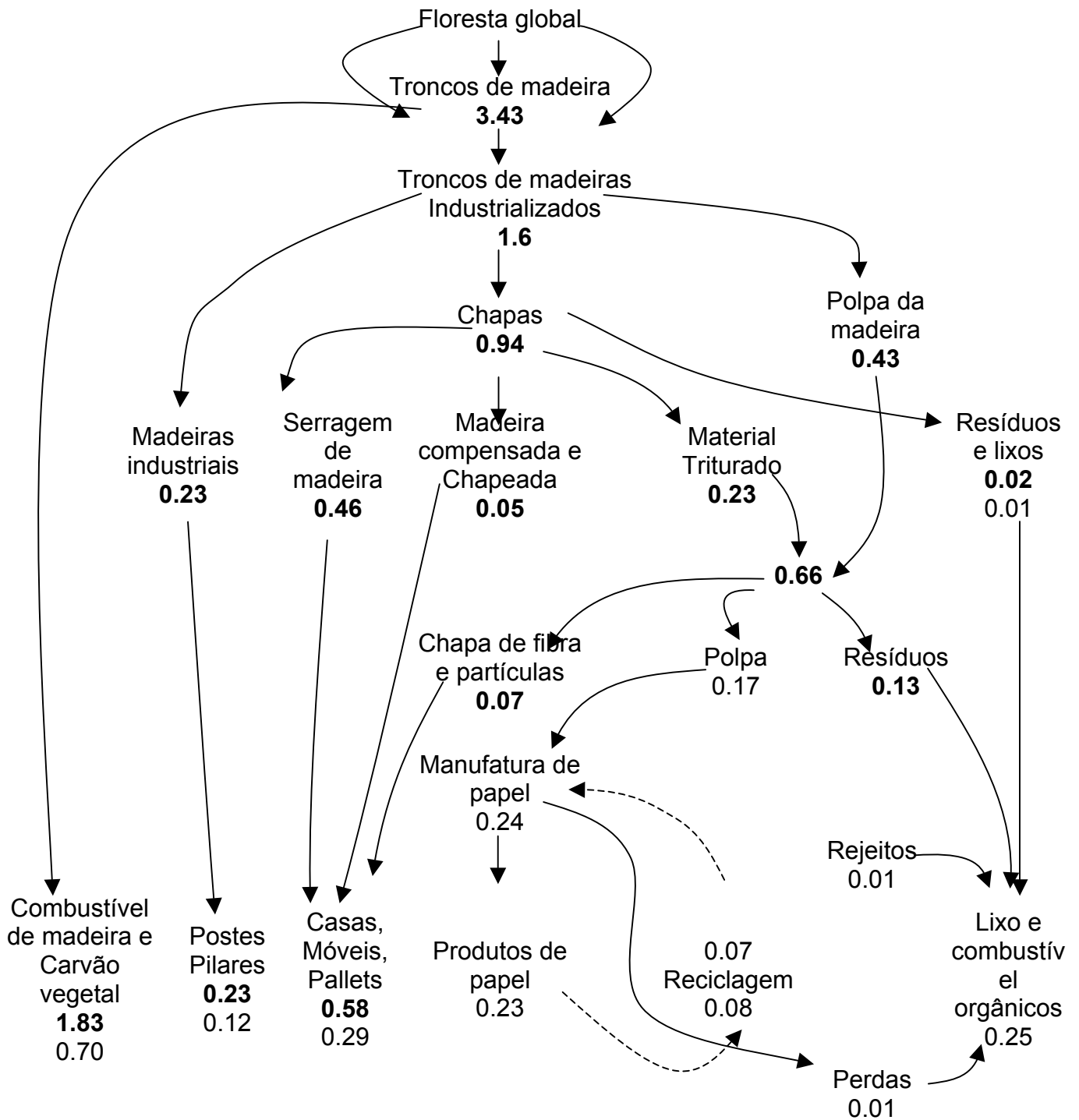


FIGURA 1 - FLUXO ANUAL GLOBAL DA MADEIRA

FONTE: BUCHANAM e LEVINE, 1999.

Por sua vez o consumo de energia pode ser reduzido com a mudança das especificações no projeto de construção. Uma noção do consumo de energia pode ser oferecida pela tabela 1 a seguir, indicando o tipo de consumo de energia para os vários padrões de construção.

TABELA 1 – MATERIAIS CONSUMIDOS NA CONSTRUÇÃO E O CONSUMO DE ENERGIA.

TIPO DE EDIFICAÇÃO	PISO	ESTRUTURA DA COBERTURA	ESTRUTURA PAREDES INTERNAS	ESTRUTURA PAREDES EXTERNAS	REVESTIMENTO EXTERIOR	JANELAS
Alto consumo de energia	Concreto	Aço corrugado	Aço	Aço	Tijolos	Alumínio
Baixo custo	Concreto	Aço corrugado	Madeira		Bloco de concreto	Alumínio
Baixo consumo de energia	Madeira	Estrutura de concreto	Madeira	Madeira	Painéis de madeira	Madeira

FONTE: BUCHANAM e LEVINE, 1999.

Cabe esclarecer que os tipos de edificações com alto consumo de energia são típicos dos países industrializados, sendo que no Brasil a estrutura costuma ser de concreto armado. Mesmo assim o quadro não diferencia muito, ou seja, quanto mais madeira tiver sendo utilizada menor o consumo de energia e conseqüente redução da emissão de CO₂.

Dessa forma BUCHANAM e LEVINE (1999) concluem que uma mudança dos materiais utilizados na construção civil, promovendo um aumento do uso da madeira, têm forte influencia na economia da energia requerida e na captura do CO₂ uma vez que isso leva ao aumento das áreas reflorestadas para uso comercial. Os autores mostram ainda que, para Nova Zelândia, um aumento de 17% do consumo de madeira na construção civil pode representar 20 % de decréscimo no consumo de energia vinda de combustíveis fósseis e 20% de redução de emissão de CO₂. Concluem ainda, que a madeira é o melhor material de construção e que seu consumo de energia é menor que o alumínio, tijolo, aço e concreto, mas esse aumento só pode ser considerado se houver um aumento correspondente nas áreas de reflorestamento para consumo comercial.

2.1 Compósitos

Com o atual desenvolvimento tecnológico observa-se cada vez mais o desenvolvimento de materiais cuja combinação de propriedades pode levar a um produto que substitua outros materiais com vantagens. O compósito pode ser considerado como um material multifásico feito artificialmente no qual as propriedades desse compósito são função das propriedades de seus constituintes, conforme CALISTER JR. (1997).

Compósito pode ser considerado, também, como um material composto por dois ou mais constituintes que possui uma fase reforçada, no caso, as fibras e uma fase ligante, o cimento. A vantagem desse compósito está na resistência e na dureza relativamente maiores que o material separadamente e o baixo peso.

A fase ligante ou o cimento transmite o esforço entre as fibras, mantendo-as protegidas do meio e permitindo sua orientação apropriada. Já as fibras além de aumentar a resistência do meio baixam seu custo. O exemplo de um compósito natural é a madeira que é composta de polímeros, celulose e lignina.

O aglomerado faz parte de um grupo de materiais que podem ser caracterizados como compósitos de madeira. Esta é uma família que contém fibras de madeira com outra constituição cujo tratamento específico garante a união dessas fibras. Assim pode-se caracterizar compósitos como um sistema de duas fases, isto é; partículas ou fibras unidas com cola ou outro aglutinante.

No entanto, compósitos de madeira são sistemas multifásicos que incluem umidade, vazios e aditivos. Neste caso, a fibra da madeira é tomada como componente básico. Porém a madeira por si só pode ser considerada como um compósito natural uma vez que consiste de fibras aglutinadas pela lignina, que neste caso funciona como cola.

A madeira também pode ser considerada como um compósito de lâminas, que consiste em um material de alta ou baixa densidade (como exemplo, cita-se o lenho inicial e o lenho tardio).

Busca-se nos compósitos obter vantagens de seus componentes de forma a atender às novas solicitações do mercado, entre elas a da sustentabilidade.

Considerando o compósito cimento madeira como membro de uma família maior, ou seja, a de compósitos com ligações inorgânicas, pode se considerar entre suas grandes vantagens seu peso leve quando comparado ao concreto e sua

capacidade de resistir às intempéries, ao fogo, aos fungos e aos ataques de insetos. WEI e TOMITA, (2000) sugerem inclusive que podem substituir o tijolo e o concreto em determinadas situações.

Há uma grande variedade de compósitos que utilizam a madeira como um de seus ingredientes no qual essa variedade depende da forma como a madeira é utilizada. A figura 2 apresenta várias formas de utilização da madeira.

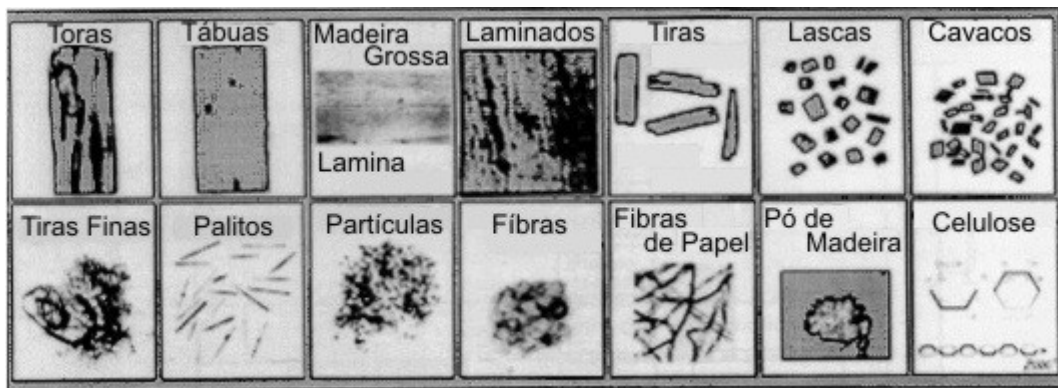


FIGURA 2 – ELEMENTOS BÁSICOS DA MADEIRA

FONTE: YOUNGQUIST - 1999

No passado a madeira foi utilizada em sua forma original, no entanto, a partir do século XX surgiu uma série de produtos derivados, entre eles os compósitos. A tabela 2 proposta por BODIG e JAYNE (1993) apresentam uma classificação para os compósitos de madeira.

Pode-se acrescentar a esta classificação os compósitos minerais, nos quais a madeira é composta com produtos de origem mineral como o mineral de magnésio e, particularmente, o cimento.

Os sistemas de lâminas constituem uma grande parte dos compósitos de madeira utilizados atualmente. Os compósitos particulados também têm grande participação no mercado, conhecidos aqui no Brasil como chapas de aglomerado.

TABELA 2 - CLASSIFICAÇÃO DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA

I - MADEIRA	
II – Madeira modificada	Madeira tratada com preservantes Madeira tratada com retardante ao fogo Madeira impregnada com resina Madeira tratada quimicamente Madeira irradiada
III - Compósito de lâminas	A – lâminas paralelas Lâminas coladas Tábuas coladas B – Lâminas cruzadas Compensado Lâminas orientadas C – Madeira reforçada D-Sanduíche de painéis E - Lâminas conectadas mecanicamente
IV - Compósitos particulados	A- Chapa de partículas Chapa de cavacos Flakeboard Chapas tipo wafer B – Chapas de fibras MDF HDF
V - Compósito de fibras	Papel Fibras reforçadas com pvc
VI - Compósitos para piso	Chapas moldadas

FONTES: BODIG e JAYNE, 1993

Um segundo grupo de compósitos particulados são os constituídos por fibras conhecidos como MDF ou HDF que tem características adequadas para diversas aplicações não atendidas pelos demais compósitos.

Outra forma de classificar os compósitos de madeira é apresentada por YOUNGQUIST (1999) que os classifica em quatro categorias, baseadas na

configuração física da madeira, ou seja: o compensado, painéis com lâminas orientadas, painéis com alta densidade e painéis com fibras de madeira.

O método convencional para painéis de madeira é utilizar a cura térmica e adesivos ou resinas especiais, como o fenol-formaldeído, a uréia-formaldeído, a melanina-formaldeído e o isocianato. Aditivos também podem ser utilizados na formação, incluindo a parafina que pode ser utilizada para impermeabilizar o produto.

A caracterização do compósito e a determinação da influência dos componentes nas propriedades dos compósitos são feitas através da moldagem de corpos de prova cilíndricos.

A relação cimento/madeira utilizada para a confecção dos corpos de prova cilíndricos, adotado por BERALDO (1995); de LATORRACA (2000); de MOSLEMI (1983) entre outros autores foi de 13:1 adotando-se, também como ponto de partida a relação água/cimento de 0,50. BLANKENHORN et al. (1994) também utilizou a relação 13:1 (cimento e madeira) para moldar seus corpos de prova. Esse autor adotou o fator água cimento igual a 0,45 moldando, no entanto, corpos prismáticos.

2.1.1 Painéis cimento madeira

A utilização de aglomerantes inorgânicos tem seu início em 1914 na Áustria, onde foi utilizada a lignocelulose e aglomerantes inorgânicos formando um painel, sendo utilizado para coberturas.

Segundo YOUNGQUIST (1999), compósitos de madeira com produtos inorgânicos são produtos ou chapas que contém entre 10% e 70% em peso, de fibras de madeira e de 30% a 90 % de produto inorgânico. Propriedades aceitáveis desse tipo de compósito podem ser obtidas somente quando as partículas, ou fibras de madeira são totalmente envolvidas com o material aglomerante, produzindo assim um painel mais homogêneo.

Os aglomerantes inorgânicos, devido às suas características têm densidade mais elevada que a madeira e comparado às resinas, a quantidade necessária é maior, por unidade de volume do compósito.

As principais categorias do aglomerante inorgânico são, segundo, YOUNGQUIST, (1999) o gesso, o cimento de magnésio e o cimento Portland. O gesso e o magnésio são suscetíveis a umidade e suas aplicações são restritas à ambientes interiores. Os compósitos derivados do cimento Portland são mais

duráveis quando comparados à madeira e podem ser aplicados tanto no interior quanto no exterior das construções. (MATOSKI et al, 2003).

As principais características das chapas minerais, que as tornam vantajosas em sua utilização, são:

- produtos virtualmente incombustíveis;
- alta resistência à umidade;
- alta resistência à biodegradação;
- elevado índice de isolamento térmico e acústico;
- possibilidade de usinagem;
- possibilidade de moldagem da superfície;
- utilização em paredes, forro, assoalhos, etc.

Os painéis compósitos têm tido boa aceitação no mundo, conforme LIPINSKI, 1994, pois busca-se através dessa mistura reunir propriedades desejáveis da madeira e do cimento. Essa união de propriedades pode ser visualizada através da figura 3.

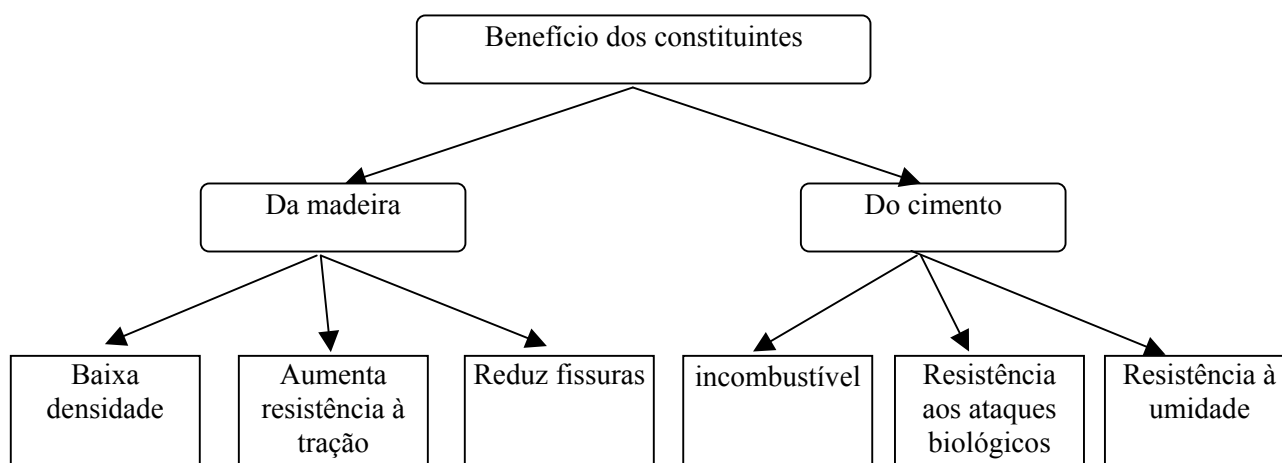


FIGURA 3 – BENEFÍCIOS DOS CONSTITUINTES NA FABRICAÇÃO DOS COMPÓSITOS

FONTE: LIPINSKI, 1994

Por sua vez, o ensaio de resistência à flexão estática, a compressão e a absorção são parâmetros importantes na caracterização dos compósitos. Por sua vez a ligação interna permite caracterizar esse compósito indicando a performance da

relação cimento-madeira-aditivo. Esse ensaio determina a eficácia da matriz cimentícia juntamente com a madeira.

2.1.2 Tipos de painéis

A – Painel do tipo "excelsior"

A densidade do painel está entre 0,24 a 0,42 g/cm³; utiliza partículas longas e estreitas (0,5 mm de largura e até 500 mm de comprimento), cuja principal finalidade é o isolamento térmico e acústico.

Utilizando partículas maiores, do tipo "excelsior" pode-se obter painéis bem mais leves, mas, no entanto com resistências muito baixas, conforme apresentado na tabela 3.

TABELA 3 – PROPRIEDADES DO COMPÓSITO DO TIPO "EXCELSIOR".

PROPRIEDADES	DE	ATÉ
Ligação interna	1,7 MPa	5,5 MPa
Módulo de elasticidade	621 MPa	1241 MPa
Resistência á compressão	0,69 MPa	5,5 MPa

FONTE: YOUNGQUIST, J. A, - 1999

A produção de chapas Excelsior pelo processo convencional é feita da seguinte forma:

- a madeira é picada em partículas;
- as partículas são imersas em água e depois de retiradas são prensadas para drenagem da água;
- as partículas são colocadas no misturador juntamente com o cimento e aditivos químicos para formar massa homogênea;
- o material é depositado sobre moldes;
- as formas com o material são empilhadas entre dois pratos, prensadas, grampeadas e retiradas da prensa e mantidas assim por 24 horas;
- após a cura do cimento os grampos são removidos e as chapas são empilhadas em posição vertical;

B – Painel do tipo Flake

A densidade do painel está entre 0,95 a 1,3 g/cm³ - utiliza partículas do tipo flake (comprimento variável e espessura variando entre 0,25 mm a 0,6 mm). Sua utilização é para forros, paredes, pisos, etc. Seu processo de fabricação é o seguinte:

- a madeira em toras é estocada em pátio para equilibrar a umidade e permitir o ataque de fungos manchadores para a degradação de componentes químicos;
- as toras são descascadas e picadas;
- parte das partículas são reduzidas em dimensões menores no moinho, para serem utilizadas nas superfícies das chapas;
- as partículas são classificadas por dimensões;
- o material é misturado com a seguinte proporção recomendada:
 - 280 kg de madeira
 - 770 kg de cimento
 - 50kg de aditivos químicos
 - 400 kg de água
- o material assim misturado é colocado sob forma de colchões;
- a prensagem do material é feita a frio até atingir a espessura final da chapa e imediatamente grampeada;
- as chapas são submetidas a cura térmica por um período de 6 a 8 horas;
- após a retirada dos grampos as chapas são empilhadas e permanecem assim por um período de 18 dias;
- as chapas são climatizadas até atingir a umidade de equilíbrio;
- as chapas sofrem processo de acabamento que envolve operações de esquadrejamento e lixamento.

É interessante observar nesse processo que a relação água cimento é relativamente elevada, ou seja, igual a 0,52.

Vários foram os autores que analisaram as propriedades dos painéis do tipo “Excelsior”. WOLFE e GJINOLLI (1994), por exemplo, que encontraram um coeficiente de determinação de 0,83 para esse tipo de painel, conforme pode se observar na figura 4.

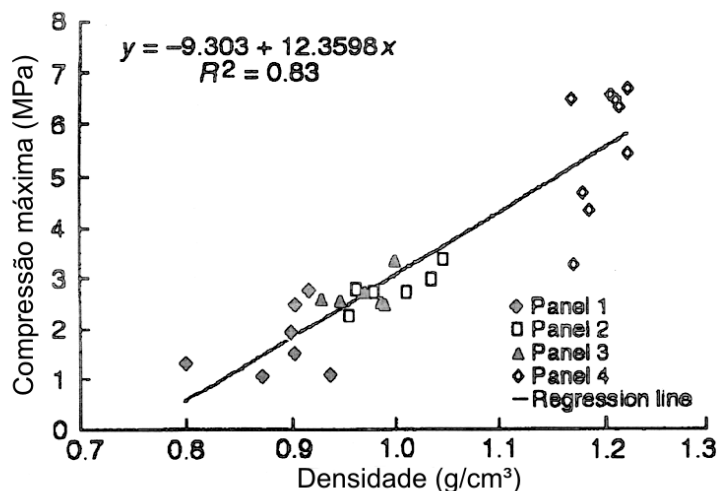


FIGURA 4 – RELAÇÃO ENTRE DENSIDADE E COMPRESSÃO MÁXIMA

FONTE: WOLFE e GJINOLI, 1994

DINWOODIE et al. (1994), por sua vez, encontraram um coeficiente de determinação relativamente elevado, ou seja igual a 0,71, quando analisaram a relação entre a densidade e a compressão.

2.1.3 Vantagens e desvantagens dos painéis cimento madeira

As principais vantagens das chapas minerais em relação aos outros tipos de chapas de madeira são:

- as partículas não precisam ser secadas a baixos teores de umidade;
- o processo de cura é exotérmico;
- o consumo total de energia é menor. (400 Gcal para 720 Gcal);
- exige a mesma quantidade de mão de obra;
- menor perda de material durante o acabamento;
- os materiais utilizados não são tóxicos;
- não há formação de gases tóxicos durante o processo;
- não formam poeira;
- não há problemas de efluentes líquidos;
- substitui as chapas de cimento amianto (KURPIEL et al., 1994).

Entre as desvantagens das chapas minerais cabe citar que o cimento é alcalino e isto pode causar a petrificação da lignocelulose. As fibras naturais sofrem com o

meio alcalino onde a extensão do ataque vai determinar a perda da resistência e esse fator varia conforme a espécie de madeira.

Os mecanismos de degradação, com particular atenção às fibras de sisal, podem ser: (BENTUR e MINDESS 1997)

- efeito de "casca" onde o final da cadeia molecular é liberada e os grupos são continuamente liberados. Isso ocorre pela reação entre o final do grupo e os íons OH^- .
- hidrólise alcalina que efetua a divisão da cadeia molecular reduzindo o grau de polimerização.

SOROUSHAN, P. et al. (1994) sugerem que nas fibras de sisal o principal mecanismo da ataque alcalino está associado a dissolução e decomposição da hemicelulose e lignina na lamela média, quebrando assim o elo de ligação entre as fibras das células, conforme figura 5.

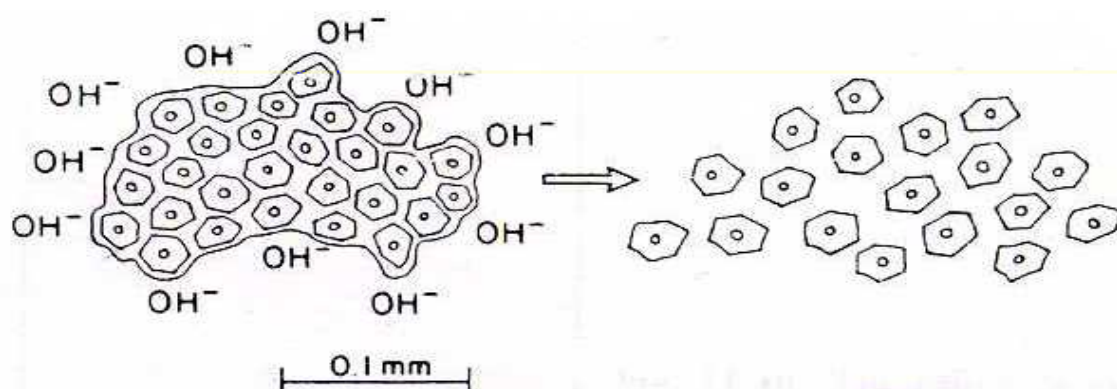


FIGURA 5 – DESCRIÇÃO ESQUEMÁTICA DA DEGRADAÇÃO DA FIBRA DE SISAL

FONTE: BENTUR e MINDESS – 1990

A hemicelulose por sua vez possui açúcar, tanino e outras substâncias que inibem a cura do cimento, reduzindo sua resistência final. Espécies de madeira com excesso de extrativos também podem causar efeito semelhante.

Para resolver esses problemas adota-se a adição de materiais pozolânicos que reduzem a alcalinidade do cimento reduzem o que é uma vantagem para a ligação do cimento com a lignina.

Outra técnica utilizada é o tratamento da chapa durante o processo de cura com o dióxido de carbono. Essa exposição faz com que o tempo de cura reduza para 5 minutos. Este fenômeno é devido a reação química do CO₂ com o hidróxido de cálcio que forma o carbonato de cálcio mais água. O uso do CO₂ também reduz em algumas espécies de madeira os componentes que inibem a cura do cimento. Ainda, chapas tratadas por meio desse processo inibem o fenômeno da eflorescência, que é a migração do cálcio para a superfície da chapa causando manchas esbranquiçadas.

2.1.4 Outros compósitos minerais

Além das chapas minerais citadas anteriormente nas quais a matéria-prima básica é a madeira, que após tratamento é misturada com o cimento e água, existem trabalhos que pesquisam a mistura de outros produtos orgânicos com o cimento.

A - Painéis com fibras de papel reciclado

As fibras recicladas de papel, incluindo as fibras secundárias, podem ser utilizadas como reforço em chapas de cimento. Entende-se por fibras secundárias da madeira, as fibras recicladas do papel e processadas através de um digestor de polpa. Esse processo remove a maior parte da hemicelulose e da lignina da parede celular, comprimindo assim a celulose. As células da madeira são ocas, e colapsam após a remoção da lignina e da hemicelulose de suas paredes.

Soroushian citado por BLANKENHORN et al., (1994) afirma que a resistência à flexão do compósito cimento e fibra de madeira é mais elevado que a do cimento puro. Ainda citam que o módulo de elasticidade do cimento decresce devido aos ciclos de gelo e degelo, o que não ocorre com o compósito.

B - Compósitos com fibra de sisal e fibras de bananeira

Pesquisas feitas com sisal (*Agave sisalana*) e fibras da bananeira, (*Musa cavendishii*) justificam sua utilização em países tropicais como o Brasil. O trabalho feito por SAVASTANO J. et al.(2000), mostra os resultados do módulo de ruptura para chapas feitas com fibras de sisal e fibras de bananeira comparadas com chapas

feitas com fibras do *Eucaliptus grandis*, e também com o *Pinus radiata*, este adotado como controle. A figura 6 mostra os resultados obtidos pelos autores.

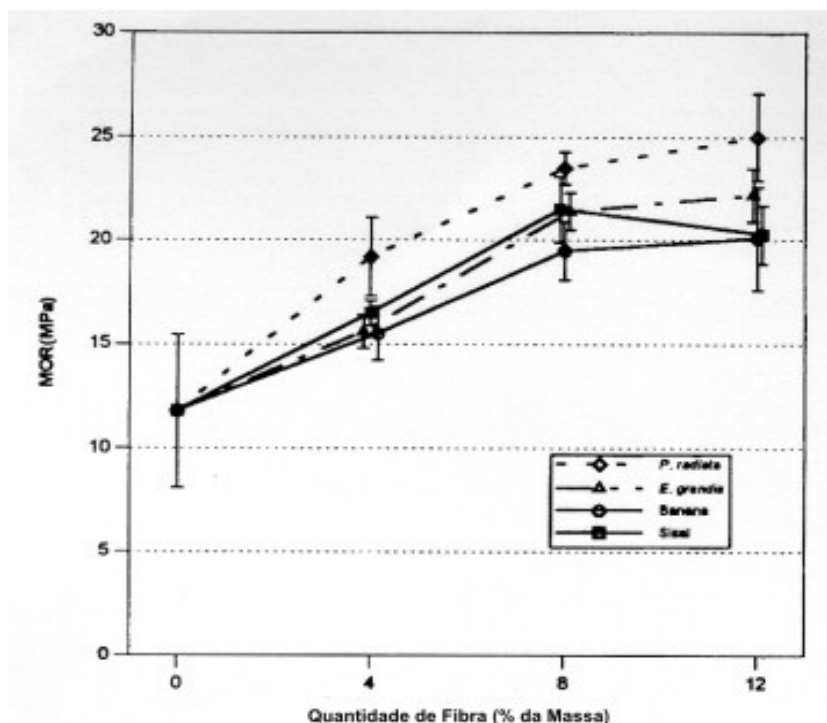


FIGURA 6 – VARIAÇÃO DO MÓDULO DE RUPTURA COM O CONTEÚDO DE FIBRA AOS 28 DIAS.

FONTE: SAVASTANO J. et al – 2000.

Os autores concluíram que apesar dos resultados serem inferiores aos do *Pinus radiata*, eles são suficientes para serem utilizadas em construções de baixo custo. Entre as vantagens da utilização de fibras da bananeira, cita-se: a) existem grandes quantidades de resíduos no Brasil; b) requer pouca energia para seu processamento; c) dispersa facilmente na matriz do cimento; d) performance aceitável como reforço do cimento.

A resistência à compressão é um dos mais importantes parâmetros utilizados para caracterizar produtos baseados no cimento. Usualmente a resistência de concreto e argamassas é determinada através do ensaio à compressão de cilindros com tamanho de 150 mm de diâmetro por 300 mm de altura. Normas americanas prescrevem o mesmo estudo utilizando cubos com aresta variando de 100 a 150 mm. Para ensaios de argamassas utilizam-se cilindros com 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, sempre respeitando a relação 2:1 (altura diâmetro).

A ruptura do corpo de prova de concreto se dá pela propagação das fissuras no corpo de prova, procurando a linha de menor energia de ruptura. Devido a esse fato a porosidade do material tem grande influencia no valor da resistência à compressão.

C - Painéis com outros tipos de aglomerante

Algumas considerações foram feitas por AGOPYAN et al (2000) a respeito dos reforços com fibra vegetal. Algumas pesquisas são direcionadas para a produção de material (telhas ou chapas para cobertura) sem a utilização da fibra de amianto. Outras pesquisas são direcionadas à produção de novos materiais, ou compósitos com a finalidade de criar novos materiais de construção.

O grande desafio na confecção das chapas que utilizam a fibra natural é garantir sua durabilidade. O meio alcalino em que estas fibras são imersas pode comprometer sua eficiência. Assim surgem mais dois aspectos para a pesquisa; o primeiro baseado na proteção dessas fibras e o segundo direcionado para a redução da alcalinidade da matriz cimentícia.

O uso da escória de alto forno ativada com sulfato de cálcio pode ser um substituto do cimento comum e oferece vantagens como a baixa alcalinidade, baixo custo, e economia de energia uma vez que aproveita material reciclado.

No ensaio realizado por AGOPYAN et al. (2000) foram feitos painéis com a utilização de escória de alto forno aditivada com 10% de gesso e 2% de cal no qual a razão água/aglomerante foi de 0,509. A mistura fresca foi reforçada com 2% de fibra de coco em volume com as seguintes propriedades: 6,5 % de ar incorporado e massa específica de 2,025. Os painéis foram feitos com 2,4 m de altura por 0,395 m de largura e espessura de 9 cm.

O desempenho mecânico foi aceitável fornecendo 6,48 MPa de resistência a compressão, o módulo de elasticidade foi de 6,55 GPa e o coeficiente de Poisson foi de 0,167.

Os painéis foram submetidos a um processo de envelhecimento natural, por 16 meses apresentando absorção de água aceitável. No entanto o desenvolvimento mecânico decresceu entre 50% e 70%. A perda da resistência a flexão é devida à evolução da carbonatação. Outro aspecto observado foi a petrificação da fibra, devida a penetração dos produtos de hidratação do cimento nos vazios da fibra, tornando o material frágil.

2.1.5 Compatibilidade entre o cimento e a madeira

A grande preocupação com a compatibilidade do cimento e da madeira se deve ao fato de que a madeira possui, em maior ou menor quantidade dependendo da espécie, carboidratos, glucosídeos e componentes fenólicos que retardam a pega do cimento. Alguns podem até inibir a pega do cimento. E sem esta fase o compósito não é formado.

Outro aspecto é que a excessiva alcalinidade do cimento dissolvido na água diminui a resistência da madeira, pois essa é pouco resistente em meios alcalinos.

A compatibilidade do cimento com a madeira pode ser expressa em termos de calor de hidratação e assim pode-se utilizar o método do calorímetro para determinar a hidratação do cimento.

A hidratação dos compostos de cimento é uma reação exotérmica. O cimento em contato com a água pode liberar até 500 J/g de calor. O calor de hidratação pode ser definido com a quantidade de calor em joules por grama de cimento não hidratado que se desprende até a hidratação completa a uma dada temperatura.

ALBERTO et al. (2000), realizaram testes com algumas madeiras do Moçambique utilizando a proporção de 0,4:1:1 entre cimento, madeira e água. A compatibilidade da madeira com o cimento foi determinada através do fator de compatibilidade F_c , obtido através da seguinte fórmula:

$$F_c = (Q_c/Q_p)*100 \quad [1]$$

sendo Q_c a energia total da hidratação da mistura cimento madeira e Q_p a energia total de hidratação do cimento. Dessa forma as figuras 7 e 8 mostram a influencia de várias espécies de madeira na reação de hidratação de dois tipos de cimento. O primeiro cimento, CPA-CEM I 52,5 (classificação moçambicana) é mais reativo que o segundo CPJ CEN II 32.5. Os picos apresentados são devidos a presença do silicato tricálcico e do aluminato tricálcico.

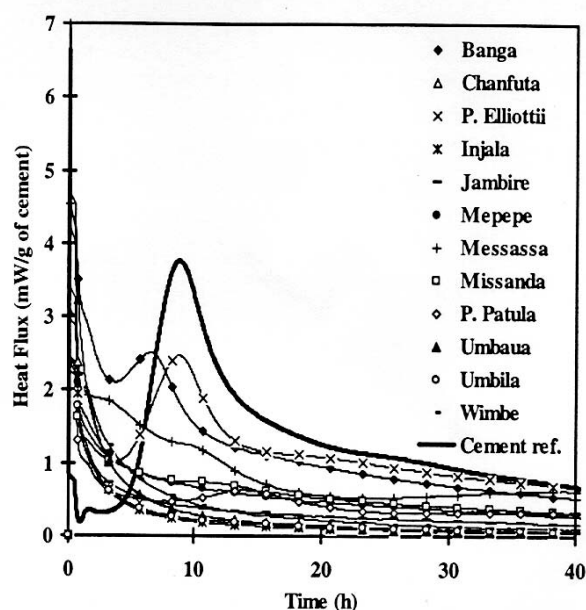


FIGURA 7 – FLUXO DE CALOR E TEMPO DE HIDRATAÇÃO PARA COMPÓSITOS E CIMENTO

FONTE: ALBERTO et al. 2000

A compatibilidade entre cimento e madeira pode ser obtida através de tratamentos dados à madeira com a finalidade de reduzir a presença de extrativos. Assim por exemplo a madeira pode ser tratada com água fria, com água quente ou com hidróxido de sódio (NaOH). A figura 7 apresenta o efeito do tratamento dado as partículas de madeira para espécies de Moçambique, sobre o fator de compatibilidade.

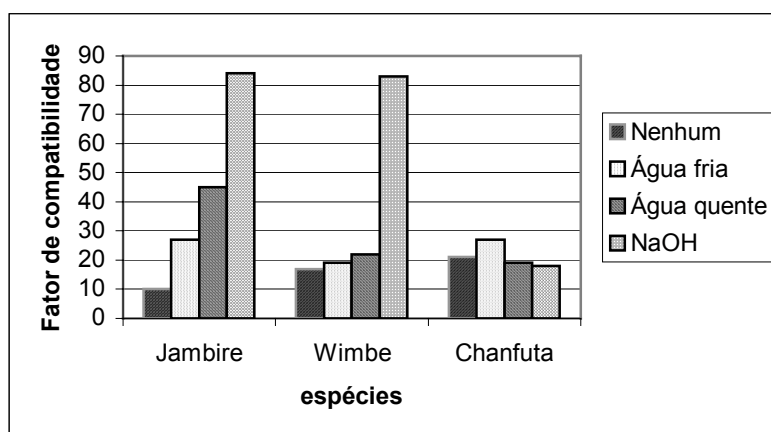


FIGURA 8 – EFEITO DO TRATAMENTO DADO ÀS PARTÍCULAS PARA TRÊS ESPÉCIES –

FONTE: ALBERTO et al. – 2000.

O estudo de ALBERTO et al. (2000) revelou que as espécies *Amblygonocarpus andongensis* e *Brachystegia speciformis*, são mais compatíveis com o cimento sem tratamento nenhum. Outras espécies, estudadas, são compatíveis desde que submetidas ao tratamento, (exceto a *Afzelia quanzenzis*) que não mostrou compatibilidade mesmo com os tratamentos.

Analisando a espécie *Eucalyptus spp*, LATORRACA (2000) concluiu que o cimento CP V ARI é o mais adequado para o uso em chapas de cimento madeira. À mesma conclusão chegou BERALDO et al. (1998) em seu estudo sobre a resistência à compressão de compósitos de madeira cimento.

Ainda, visando melhorar a durabilidade do compósito reduzindo a alcalinidade do meio que envolve a madeira e que leva a sua degradação alguns autores como HERMAWAN (2001) analisam o efeito da aplicação do dióxido de carbono CO₂ em forma de gás. Essa aplicação leva à rápida formação do carbonato de cálcio que além de retirar o cálcio do meio, reduzindo a alcalinidade, cria o ácido carbônico que apesar de sua curta vida útil, também colabora para redução dessa alcalinidade.

O elevado índice de inibição encontrado para algumas espécies, no ensaio à compressão axial pode ser devido ao elevado teor de finos. (LATORRACA, 2000).

Estudos com traços distintos do compósito foram feitos por MOSLEMI e MANGALA (1994) mostraram que existe um teor ótimo de pasta de papel que pode ser utilizado juntamente com o cimento que maximiza as propriedades desse compósito. Alguns aditivos como o cloreto de cálcio foram utilizados para melhorar a qualidade final do produto.

2.1.6 Granulometria

BERALDO et al. (1998) utilizando o *Eucalyptus grandis* moldou uma série de corpos de prova para estudo da resistência mecânica no qual as características físicas foram: massa específica aparente = 275 kg/m³ e módulo de finura MF = 4,30. O diâmetro máximo das partículas utilizadas neste ensaio foi de 2,4 mm. A relação cimento madeira adotada em seu experimento foi de 13:1 respectivamente.

O fato é que um mesmo módulo de finura pode representar um número muito grande de distribuições de tamanhos completamente diferentes. Dessa forma o módulo de finura não pode ser utilizado como representação de uma dada

granulometria, mas pode ser útil para detectar pequenas variações no agregado de mesma origem. Pode ainda dar indicação do comportamento provável da mistura.

Entre os fatores nos quais a granulometria do agregado influencia têm-se a sua área superficial, que necessita maior quantidade de água para molhar sua superfície.

O caráter econômico da mistura leva a aumentar o volume do agregado ao máximo possível, pois tem o custo menor que a pasta de cimento. Mas também existe o lado técnico, pois quanto maior a quantidade de madeira, mais leve fica o painel.

As reações que fazem com que o cimento se torne um elemento ligante ocorrem na pasta de água e cimento onde os aluminatos e silicatos formam produtos hidratados que com o correr do tempo dão origem a uma massa firme e resistente.

LATORRACA (2000) adotou a relação cimento madeira de 1:13,33 e 0,43 como fator água cimento, muito próxima àquela adotada por (BERALDO et al. 1998). Observa-se uma elevada quantidade de cimento adotada por esses autores. Já ALBERTO et. al. (2000), adotaram uma relação cimento madeira mais baixa e um fator água cimento extremamente elevado e aparentemente desnecessário. Isto porque conforme NEVILLE (1997), a resistência da argamassa de cimento diminui com o aumento do fator água cimento a partir de 0,23, pois abaixo desse valor a quantidade de água é insuficiente para reagir com todo o cimento.

2.1.7 Fabricação dos painéis cimento-madeira

A questão da moradia é um dos grandes problemas no mundo que, se não pode ser resolvido imediatamente deve pelo menos ser drasticamente reduzido. Dessa forma o painel de cimento madeira pode facilitar a solução desse problema, pois além da reduzida densidade quando comparada ao concreto existe a facilidade de seu manuseio que permite por sua vez rapidez na execução de projetos populares de baixo custo (DEWIT, 1994).

As chapas tanto de cimento amianto como de cimento madeira tiveram um crescimento considerável em poucos anos. A exemplo desse fato KUROKI et al. (1994) citam em seu artigo que a produção dessas chapas passou de 5 milhões de m² em 1973 para 100 milhões de m² em 1993, isso apenas no Japão.

Ainda, o compósito feito com cimento e madeira tem, além de outras vantagens já citadas uma maior deformabilidade, ou seja, é possível visualizar possíveis ações

de cargas antes do colapso da estrutura ou do painel, havendo tempo necessário para as providências que forem necessárias (AROLA 1994). Em geral as chapas de cimento-madeira têm sua densidade entre 1,11 a 1,43 g/cm³ e o módulo de ruptura entre 7,5 a 19 MPa. (DINWOODIE, 1994).

Já a empresa SERIBO S/A conforme BIRAULT, (1994) fabrica seus painéis com a seguinte proporção:

- madeira: 0,93 m³ (com densidade variando entre 0,30 e 0,40 g/cm³);
- cimento: 835 kg/m³;
- sulfato de alumínio: 8,3 kg/m³;
- silicato de sódio: 29,0 kg/m³ ;

No sistema ELTEN® os painéis são fabricados com espessura de 15 a 150 mm e com largura entre 500 a 600 mm. O comprimento por sua vez varia entre 2000 e 4000 mm. Este sistema é utilizado por fabricantes da Alemanha desde 1956.

Os painéis fabricados pela ECO-CEN® desde 1986, segundo AHO (1994), com a cinza de alto forno como aglomerante utilizam a seguinte dosagem dos materiais:

- Aglomerante: 800 a 900 kg;
- Madeira : 300 a 400 kg;
- Água: 200 a 300 kg;
- Aditivo: 70 a 90 kg.

A densidade obtida com esse traço é de 1,333 g/cm³ tendo um módulo de ruptura em torno de 10,1 MPa, um módulo de elasticidade de 5280 MPa e a ligação interna com valores em torno de 0,84 MPa.

Cabe a observação de que quanto maior o teor de aditivos, mais caro fica o painel, fator importante para a estratégia de comercialização.

KARSTEN e SATTTLER, (1994), utilizaram em seus estudos para a fabricação de painéis de cimento madeira a seguinte proporção:

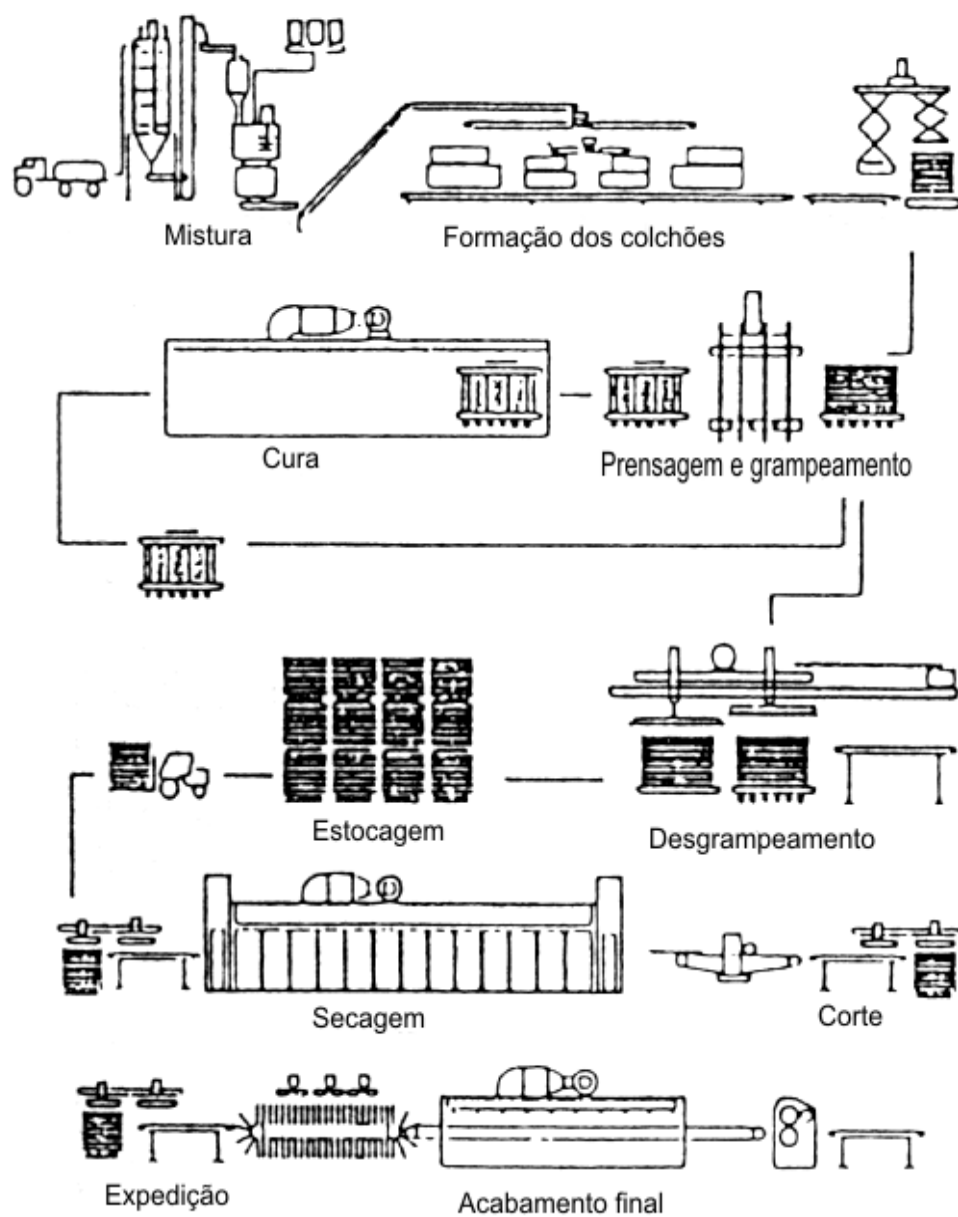
- Relação madeira/cimento: 0,25
- Relação água/cimento: 0,40
- Densidade projetada: 1,25 g/cm³
- Espessura do painel: 16 mm

O Tamanho das partículas de madeira utilizadas situou-se entre 0,10 mm e 0,40 mm tanto para a espessura quanto para a largura sendo o comprimento em torno de 0,315 mm.

Na figura 9 está apresentado de forma esquemática um modelo de fabricação dos painéis de cimento madeira. Segundo KUROKI (1994) esse esquema foi desenvolvido pela BISON®, fábrica alemã. A partir desse sistema outros foram desenvolvidos, acrescentando ou retirando sistemas de autoclave, secadores especiais e outros tipos de equipamentos.

Na execução desses painéis observa-se que logo após a mistura dos componentes (cimento, madeira, água e aditivos) são formados os colchões dessa mistura que serão prensados. Após a prensagem esses colchões são grampeados e sofrerão o processo de cura, cuja duração varia, conforme o fabricante.

Concluído o processo de cura, os grampos são retirados e o material é estocado, durante período definido pelo fabricante. Na seqüência os painéis passam pelo processo de secagem, corte, embalagem e expedição. (KUROKI, 1994).



Fonte: Yasuo Kuroki (1994)

FIGURA 9 – SISTEMA DE FABRICAÇÃO DE PAINEL CIMENTO-MADEIRA
FONTE: KUROKI, 1994

2.2 Componentes

Geralmente as chapas de cimento e madeira são compostas de cimento, madeira na forma de fibras ou partículas, água e aditivos químicos. O cimento tem a função básica de atuar como aglomerante propiciando características físico-mecânicas de resistência e durabilidade. A madeira tem a função de aumentar a resistência à flexão, diminuir a densidade e melhorar outras propriedades como o isolamento térmico e acústico, por exemplo. Os aditivos e eventualmente as adições atuam como facilitadores na afinidade do cimento com a madeira, já que a mesma possui em sua composição substâncias que prejudicam a relação entre o cimento e a madeira.

Entre os aglomerantes minerais utilizados na fabricação de chapas, existe o gesso. Esse material pode ser derivado de fontes naturais ou obtido artificialmente. Os painéis de gesso são largamente utilizados na construção civil e são conhecidos com painéis “*dry-wall*” porque utiliza sistema de colocação a seco. Alguns desses painéis são revestidos com papel para facilitar suas aplicações.

Outro tipo de aglomerante é a magnesita ou o chamado cimento “*sorell*” que é utilizado para a fabricação de chapas do tipo “*Excelsior*”. No entanto, devido aos custos sua produção é pequena. A vantagem sobre o cimento portland é que a magnesita não sofre influência dos vários tipos de açúcares encontrados na madeira. A magnesita é mais tolerante ao excesso de água utilizada durante a produção. No entanto, esses painéis são sensíveis à presença da água. São menos sensíveis que os painéis de gesso, mas mais sensíveis que os de cimento portland. No entanto, o produto mais utilizado para esse tipo de compósito é o cimento portland, apresentado a seguir.

2.2.1 O Cimento Portland

Cimento, na acepção geral da palavra, pode ser considerado como todo material com propriedades adesivas e coesivas capaz de unir fragmentos de minerais entre si de modo a formar um todo compacto (BLEZARD, 1998).

O cimento tem a propriedade de reagir quimicamente com a água transformando-se, em princípio, em uma massa plástica, perfeitamente moldável, que endurece com o tempo, adquirindo altas resistências.

Para os objetivos de construções em concreto, o termo cimento restringe-se à aglutinação de materiais como: areias, pedras, blocos, aço, etc (ANDRIOLO, 1984).

No campo da construção, o significado do “cimento” se restringe aos materiais de cimento calcário. Os cimentos que interessam para o preparo do concreto têm a propriedade de endurecer mesmo dentro d’água, devido a reações químicas com essa substância, e, portanto, são denominados cimentos hidráulicos. Estes são constituídos principalmente por silicatos e aluminatos de cálcio e podem ser classificados de forma ampla como cimentos naturais, cimentos Portland e cimentos aluminosos. (BLEZARD, 1998).

A - Histórico

O emprego de cimentos é bem antigo. Os antigos egípcios usavam gesso impuro calcinado. Os gregos e romanos usavam calcário calcinado e aprenderam, posteriormente, a misturar cal e água, areia e pedra fragmentada, tijolos ou telhas em cacos. Foi o primeiro concreto da História. A argamassa de cal não endurece embaixo d’água e, para construções submersas, os romanos trituravam cal conjuntamente com cinzas vulcânicas ou telhas de barro cozido, finamente trituradas. A sílica ativa e a alumina das cinzas reagiam com a cal produzindo o que hoje se conhece como cimento pozolânico. A denominação de cimento pozolânico ainda é usada para designar os cimentos simplesmente obtidos pela moagem de materiais naturais à temperatura ambiente. (MASSAZA, 2001).

Com a Idade Média, houve um declínio geral na qualidade e uso do cimento e somente no século XVIII se registrou um avanço da tecnologia desse material. Em 1756, John Smeaton, encarregado de reconstruir o farol de Eddystone, descobriu que se obtinha uma argamassa melhor quando a pozolana era misturada ao calcário com elevado teor de argila, até então indesejável (NEVILLE, 1997).

Admite-se que o protótipo do cimento moderno foi obtido em 1845, por Isaac Charles Johnson, pelo aquecimento de uma mistura de argila e calcário até a clinquerização, para dar origem às reações necessárias à formação de compostos de um cimento bastante resistente (SCANDIUZZI, 1986).

A designação “Cimento Portland” foi dada originalmente devido à semelhança de cor e qualidade com as pedras de Portland – um calcário de Dorset – e permanece até hoje no mundo todo, referindo-se ao cimento obtido pela mistura íntima de materiais calcários e argilosos, ou sílica e alumina e óxidos de ferro (NEVILLE, 1997). A sinterização desses materiais dá origem ao clínquer que após a moagem torna-se cimento.

O cimento Portland, segundo MACPHEE (1998), é um material pulverulento produzido a partir de uma mistura de calcário e argila calcinada até a fusão parcial, resultando daí o clínquer que misturado com gesso e moído à determinada finura dá origem ao cimento Portland.

Como resultado de vários estudos sobre cimento observa-se historicamente um crescimento da resistência à compressão do cimento. O desenvolvimento do cimento tecnológico pode ser estudado com respeito ao período cronológico como indicado na figura 2.

O período 1, dominado pela tecnologia britânica, mostra a era do meso-Cimento Portland enquanto o período 2, dominado pela tecnologia alemã, é o estágio de transição começando com o controle de qualidade e precedendo o período 3, o qual representa o cimento Portland normal, conforme figura 10 a seguir.

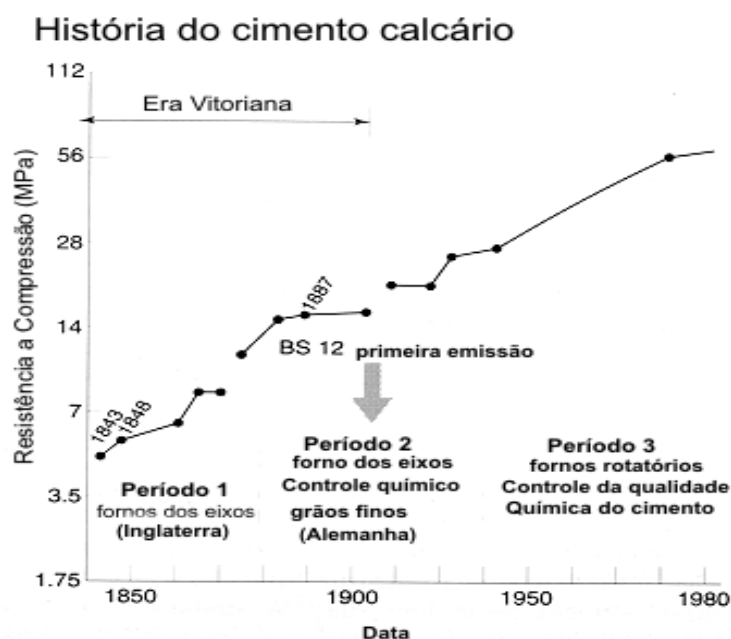


FIGURA 10 - EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA DO CIMENTO

FORNE: BLEZARD, 1998

B – Matéria-prima para a fabricação do cimento

As matérias-primas utilizadas na fabricação do cimento Portland consistem principalmente de calcário, sílica, alumina e óxido de ferro. Estes compostos interagem entre si no forno formando uma série de produtos mais complexos e, com exceção de um pequeno resíduo de cal que não teve tempo suficiente para reagir, é atingido um estado de equilíbrio químico.

Na realidade, os silicatos dos cimentos não são compostos puros, mas contêm óxidos secundários, em pequenos teores, em solução sólida. Estes óxidos têm efeitos significativos nos arranjos atômicos, nas formas cristalinas e nas propriedades hidráulicas dos silicatos (MACPHEE, 1998).

C - Componentes do clínquer

De acordo com NEVILLE (1997), a partir da definição de cimento Portland pode-se constatar que esse material é constituído principalmente de material calcário, como rocha calcária ou gesso, e alumina e sílica, encontrados como argilas ou xisto. Pode também ser usada a mistura de materiais calcários e argilosos. Essas matérias-primas são sintetizadas em fornos, em altas temperaturas, resultando em um produto denominado clínquer. Esse clínquer é resfriado rapidamente e posteriormente moído com adição de gesso. Durante o processo de clínquerização, isto é, sinterização no forno, os componentes principais das matérias-primas utilizadas reagem quimicamente entre si para formarem os componentes do clínquer (ABCP, 1997).

Assim é que a cal, presente no calcário, e sílica, alumina e ferro, presentes na argila, se combinam para formar o silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e o ferro aluminato tetracálcico (C_4AF), os quatro compostos mineralógicos dos cimentos Portland.

Além dos quatro compostos principais, são encontrados nos cimentos Portland quantidades menores de MgO, CaO “livre” e sulfatos alcalinos (JACKSON, 2001).

O método mais utilizado para determinar quantitativamente a composição de um clínquer tem sido o cálculo de Bogue. Esse cálculo, idealizado por Bogue em 1929, baseia-se na análise química do clínquer e parte do pressuposto que os compostos principais deste (C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF) possuem uma composição exata e são totalmente cristalizados.

Os resultados da análise química são sempre expressos em óxidos dos elementos presentes no cimento, isto é, CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO etc. No entanto a quantidade de CaO que está presente na forma de CaO livre é determinada separadamente na análise química.

Da quantidade total de CaO determinado são subtraídas as quantidades de CaO presentes como cal livre, e o CaO restante, juntamente com o SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 são então utilizados para calcular os teores de C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF .

Inicialmente é calculado o teor de C_4AF , em função do teor de Fe_2O_3 determinado pela análise. Em seguida é feito o cálculo do C_3A , em função do Al_2O_3 , remanescente, ou seja, do Al_2O_3 total menos o Al_2O_3 necessário para formação do C_4AF . E, finalmente, é feito o cálculo dos teores de C_3S e C_2S baseando-se na quantidade de SiO_2 da análise e do CaO que restou após a formação do C_3A e C_4AF . (LAWRENCE, 1998).

As equações de Bogue para estimar a composição potencial dos compostos do clínquer estão apresentadas a seguir:

$$C_4AF = 3,04 Fe_2O_3;$$

$$C_3A = 2,65 Al_2O_3 - 1,69 Fe_2O_3;$$

$$C_3S = 4,07 CaO - 7,60 SiO_2 - 1,43 Fe_2O_3 - 6,72 Al_2O_3;$$

$$C_2S = 2,87 SiO_2 - 0,754 C_3S.$$

D - Propriedades dos compostos do clínquer

O Silicato tricálcico (C_3S) é o principal responsável pelas propriedades hidráulicas dos cimentos. Puro, reage rapidamente com a água provocando uma imediata liberação de calor e elevada resistência inicial. O tempo decorrido entre o início e o fim de pega (ou seja, o início do endurecimento) é de poucas horas e a quantidade de água requerida pela massa é maior que a quantidade de água que uma pasta de cimento necessita para dar uma plasticidade semelhante. A adição de gesso torna a massa mais plástica e afeta a pega, acelerando-a ou retardando-a. As propriedades mecânicas produzidas pelo C_3S no cimento são influenciadas pela presença de óxidos em soluções sólidas.

O Silicato dicálcico (βC_2S) reage lentamente com a água e apresenta inicialmente pouca resistência mecânica, mas que tende a aumentar significativamente com o decorrer da hidratação. O βC_2S puro, misturado com água, proporciona uma massa cuja pega só é alcançada depois de alguns dias e que apresenta moderado calor de hidratação.

O Aluminato tricálcico (C_3A) puro, quando misturado com a água, proporciona uma massa que apresenta pega muito rápida, quase sempre instantânea, e desprendimento de calor muito grande. Se imediatamente após a pega, a massa voltar a ser misturada apresentará uma consistência plástica e trabalhável. Uma adição de gesso da ordem de 15% tem a propriedade de retardar a pega obtendo um tempo normal. A massa de C_3A produz alguma resistência mecânica com um dia de

idade quando colocada em atmosfera úmida, mas não apresenta subsequente evolução de resistência e quando colocada em água a massa se desintegra imediatamente.

O C_3A contribui para um pequeno aumento da resistência nas baixas idades, mas resulta em propriedades indesejáveis ao concreto, com conseqüente aumento do calor, baixa resistência aos sulfatos e variação volumétrica.

Por sua vez o ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) também reage rapidamente com a água apresentando pega em poucos minutos, acompanhada de significativo desprendimento de calor.

O óxido de cálcio livre (CaO), que aparece livre nos clínqueres de cimento Portland, pode produzir expansão se o seu conteúdo exceder certos limites. A transformação de CaO em $Ca(OH)_2$, no processo de hidratação se verifica, segundo ANDRIOLO (1945), sem dissolução prévia e acompanhada de um forte aumento de volume aparente, dando lugar a grandes tensões. Como a hidratação do CaO cristalizado é muito lenta, essa expansão só ocorre depois do endurecimento do cimento, provocando a desintegração.

A Magnésia (MgO) o óxido de magnésio puro possui propriedades hidráulicas distintas devido à temperatura a que é submetido. Segundo ANDRIOLO (1945), o MgO levemente calcinado combina com a água para formar o $Mg(OH)_2$ mas a massa não apresenta pega, enquanto que o MgO calcinado a altas temperaturas combina-se com água produzindo uma massa consistente e de baixa resistência mecânica. O MgO pode se apresentar incorporado aos outros compostos do clínquer ou na forma de MgO livre, formando cristais de periclásio. A presença desses cristais no clínquer resulta em um cimento com pouca estabilidade de volume devido à expansão que acompanha a lenta hidratação desses cristais.

Nos clínqueres com alto teor de MgO (acima de 4%), a expansão causada por este composto pode ser eliminada através do rápido resfriamento do clínquer, isto porque o MgO permanece na forma vítrea ou forma pequenos cristais que se hidratam rapidamente.

Os álcalis presentes nos cimento reagem preferencialmente com o SO_3 para formar sulfatos que ficam no clínquer. Quando a quantidade de SO_3 é insuficiente, os álcalis em excesso são tomados pela belita para formar o $KC_{23}S_{12}$ ou se incorporam como aluminato alcalino na forma de nC_8A_3 .

Segundo SCANDIUZZI (1986), os sulfatos alcalinos afetam a pega dos cimentos, regulando-a, ou seja, permitindo um controle do tempo de pega. São solúveis em água, enquanto que os álcalis combinados com os silicatos e aluminatos se solubilizam vagarosamente. A presença de álcalis é indesejável porque podem ocorrer reações entre os álcalis e certos tipos de agregados. No processo de fabricação, os álcalis beneficiam o rebaixamento da temperatura de formação da fase líquida, podem causar pequeno aumento no teor de C_3S e conduzir a formação de CaO livre.

E - Propriedades das pozolanas e outras adições

Um dos materiais comuns classificados como material cimentício é a pozolana, um material natural ou artificial contendo sílica em forma ativa. A pozolana pode ser descrita como um material silicoso ou sílico-aluminoso que, por si só, tem pouco ou nenhum valor cimentício, mas, quando finamente subdividido e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente formando compostos com propriedades cimentícias (MASSAZZA, 1998).

Em geral, os materiais pozolânicos podem ter origem natural ou artificial. Os mais comumente encontrados são: cinzas vulcânicas – a pozolana original – pumicita, opalina, micas e calcedônias, terras diatomáceas calcinadas e argila calcinada.

Algumas pozolanas naturais podem causar problemas devido às suas propriedades físicas como, por exemplo, as terras diatomáceas que, devido à sua porosidade e angulosidade, demandam alto teor de água. Algumas pozolanas naturais têm suas atividades melhoradas por calcinação a temperaturas entre $550^{\circ}C$ e $1100^{\circ}C$, dependendo do material.

F - A pega do cimento

Pega é o termo usado para descrever o enrijecimento da pasta. O tempo de pega é um período, arbitrário, do tempo decorrido desde o instante do contato água-cimento até o instante que essa pasta suporte a penetração da agulha de Vicat .

O tempo de pega é afetado pelas características físico-químicas do cimento, as condições climáticas, qualidade, quantidade e temperatura da água de amassamento. A finura também influi sobre o tempo de pega, que diminui com o aumento da finura, (ODLER, 1998)

A velocidade do processo da pega não é necessariamente um sinônimo da velocidade de endurecimento da pasta ou do concreto. Uma pega rápida poderá ser produzida pela variação da composição do cimento, como por exemplo, a falta de gesso durante a moagem e poderá também ser compensada pela utilização de certos aditivos como o carbonato de sódio. O tempo de pega do cimento é afetado pela temperatura, sendo que em baixa temperatura a pega é retardada (ANDRIOLO, 1984).

Algumas vezes o cimento pode apresentar o fenômeno de falsa pega que se caracteriza por um brusco aumento no enrijecimento da pasta, sem apresentar grande despreendimento de calor. A falsa pega se diferencia da pega rápida pois se a pasta for energicamente remisturada, a plasticidade inicial é recuperada. A falsa pega é provocada pela desidratação do gesso. A desidratação pode ocorrer durante a moagem, quando a temperatura no interior do moinho é elevada, ou quando os cimentos são armazenados com temperatura elevada (SCANDIUZZI, 1986).

O tempo de fim de pega é definido pelo período decorrido desde a mistura até o instante em que a agulha de Vicat, aplicada suavemente sobre a superfície da pasta, não deixa marcas apreciáveis.

G - Hidratação

As reações que fazem com que o cimento se torne um agente ligante ocorrem na pasta de água e cimento. Em outras palavras, na presença de água, os silicatos e aluminatos formam produtos de hidratação que, com o transcorrer do tempo, dão origem a uma massa firme e resistente, a pasta de cimento endurecida (NEVILLE, 1997).

A hidratação pode ocorrer de duas maneiras, pela incorporação direta das moléculas de água nos compostos do cimento ou pela hidrólise. Le Chatelier foi o primeiro a observar que os produtos de hidratação do cimento são os mesmos obtidos com a hidratação em separado dos componentes em condições similares.

Os produtos de hidratação do cimento são pouco solúveis na água como se evidencia pela estabilidade da pasta de cimento hidratada em contato com água. O cimento hidratado adere firmemente ao cimento que não reagiu, mas não é conhecido o mecanismo exato de como isso ocorre. É possível que o produto de hidratação recém produzido forme um envoltório que cresce pela ação da água que tenha atravessado a película já formada. Ou ainda, os silicatos podem atravessar esse

envoltório e precipitar-se como uma camada externa. Uma terceira possibilidade é de que a suspensão coloidal se precipite por toda a massa após a saturação, prosseguindo a hidratação no interior dessa estrutura (NEVILE, 1997).

Qualquer que seja o modo de precipitação dos produtos de hidratação, a velocidade de hidratação decresce continuamente de modo que, mesmo após um longo tempo, permanece uma quantidade apreciável de cimento não hidratado. Por exemplo, após 28 dias em contato com a água, foram encontrados grãos de cimento hidratado superficialmente a profundidade de até $4\mu\text{m}$ e após um ano, de até $8\mu\text{m}$ (ODLER, 1998).

Os principais produtos da hidratação podem ser classificados em silicatos de cálcio hidratados e aluminato tricálcico. Acredita-se que o C_4AF se hidrate resultando aluminato tricálcico e uma fase amorfa. Também é possível que um pouco de Fe_2O_3 esteja presente em solução sólida no aluminato tricálcico hidratado (ODLER, 1998).

H - Reação dos componentes do cimento

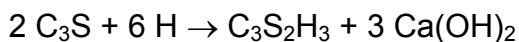
- SILICATOS

As velocidades de reação do C_3S e C_2S , em estado puro, são muito diferentes. A velocidade de hidratação do C_2S é mais lenta que a do C_3S ANDRIOLO, (1984). Nos cimentos comerciais, os silicatos de cálcio contêm pequenas impurezas de alguns óxidos presentes no clínquer. O C_3S impuro é conhecido como alita e o C_2S impuro, como belita. Essas impurezas têm efeito considerável sobre as propriedades dos silicatos de cálcio hidratados.

Segundo NEVILE (1997), quando ocorre a hidratação, com uma quantidade limitada de água, como no caso da pasta de cimento e do concreto, acredita-se que o C_3S sofra hidrólise, produzindo um silicato de cálcio com basicidade menor e, no fim, $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$, liberando cal na forma de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. No entanto, para este autor, não é certo que o C_3S e o C_2S resultem no mesmo composto hidratado. Já para SCANDIUZZI (1986), a hidratação desses dois tipos de silicatos de cálcio origina sempre um mesmo silicato cálcico hidratado, denominado gel de tobermorita ou fase C-S-H, e hidróxido de cálcio. O silicato cálcico hidratado é o principal responsável pelas propriedades hidráulicas dos cimentos.

Na suposição de que o $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ seja o produto final da hidratação do C_3S e do C_2S , as reações de hidratação podem ser escritas, como orientação e não como equações estequiométricas exatas, como segue:

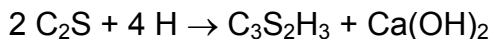
Para o C_3S :



As massas correspondentes envolvidas são:

$$100 + 24 \rightarrow 75 + 49$$

Para o C_2S :



As massas correspondentes são:

$$100 + 21 \rightarrow 99 + 22$$

Assim, com base nas massas, os dois silicatos necessitam de quantidades aproximadamente iguais de água para hidratação, mas o C_3S produz mais do que o dobro da quantidade de hidróxido de cálcio, quando comparado com o C_2S (NEVILE, 1997).

- ALUMINATO TRICÁLCICO

A reação do C_3A puro com água é muito violenta e resulta um enrijecimento imediato da pasta, conhecido como pega instantânea NEVILE, (1997). Para retardar e controlar o tempo de início de pega adiciona-se gesso ou outras formas de sulfato de cálcio na moagem do clínquer do cimento.

O gesso e o C_3A reagem formando um sulfoaluminato insolúvel ($3CaO.AI_2O_3.3CaSO_4.31H_2O$), mas, eventualmente há a formação de um aluminato de cálcio hidratado. À medida que mais C_3A entra em solução, a composição muda e o teor de sulfato decresce continuamente. A velocidade da reação do aluminato é muito grande e, se este reajuste na composição não for bastante rápido, é provável que ocorra a hidratação direta do C_3A . A quantidade de gesso a ser adicionada ao clínquer de cimento deve ser cuidadosamente observada: o excesso de gesso leva a uma expansão e conseqüente desagregação da pasta de cimento (NEVILE, 1997).

I - Tipos de cimento

De acordo com a proporção de determinados compostos do cimento pode-se ter vários tipos de cimento. Essa variação é decorrente das várias finalidades as quais é destinado o cimento. Assim por exemplo cimento destinado para obras marinhas deve ter uma composição distinta dos cimentos destinados às demais obras.

A figura 11 apresenta a relação entre o tempo necessário para atingir determinada resistência à compressão e o tipo de cimento.

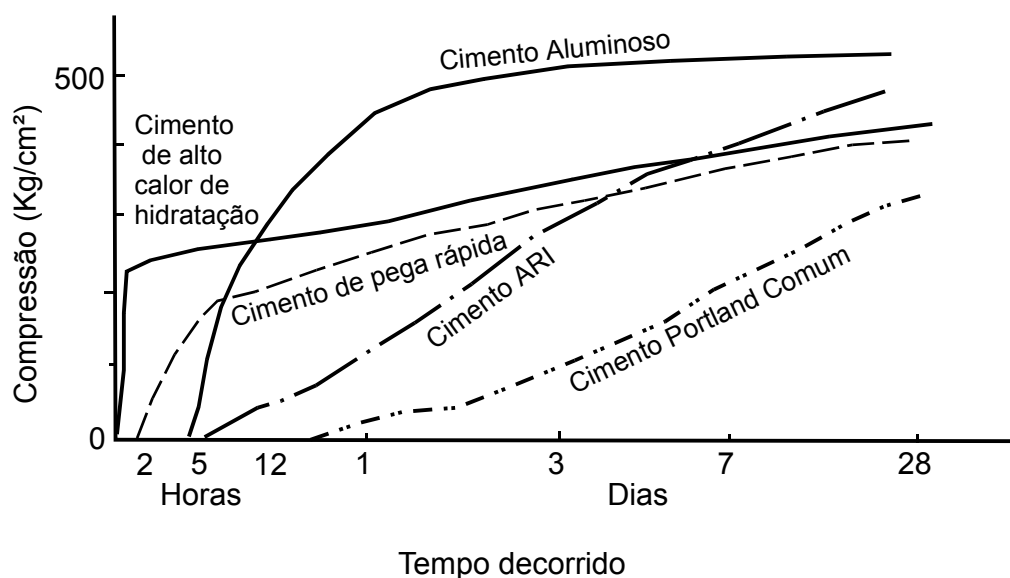


FIGURA 11 – RELAÇÃO DO TIPO DE CIMENTO E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

FONTE: AOKIO, Y. – 1994

J – O cimento de alta resistência inicial

O Cimento Portland de alta resistência inicial, segundo a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas, é um aglomerante hidráulico que atende às exigências de alta resistência inicial, obtido pela moagem de Clínquer Portland (constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio com propriedades hidráulicas) ao qual se adiciona uma ou mais formas de sulfato de cálcio em quantidade necessária. Podendo adicionar ou não materiais carbonáticos no teor especificado na tabela 4, no qual esse material quando utilizado como adição deve ter no mínimo 85% de carbonato de cálcio.

TABELA 4 – COMPONENTES DO CIMENTO CP V ARI

COMPONENTES (% EM MASSA)	
Clínquer + sulfatos de cálcio	Material carbonático
100 – 95	0 - 5

FONTE: NBR 5733

A NBR 5733 (1991) apresenta também as exigências químicas as quais devem ser atendidas pelos fabricantes desse tipo de cimento, conforme tabela 5.

TABELA 5 – CARACTERÍSTICAS DO CIMENTO ARI

DETERMINAÇÕES QUÍMICAS	LIMITES (% DA MASSA)
Resíduo insolúvel	1,0
Perda ao fogo (PF)	4,5
Óxido de Magnésio (MgO)	6,5
Trióxido de Enxofre (SO ₃)	
- quando C3A do Clínquer –8%	3,5
- quando C3A do Clínquer <8%	4,5
Anidrido Carbônico (CO ₂)	3,0

FONTE NBR 5733 (1991)

O cimento de alta resistência inicial fornece resistência mínima de 34 MPa aos 7 dias de idade, diferentemente do cimento comum que chega a essa resistência apenas aos 28 dias de idade.

2.2.2 A madeira

Historicamente a madeira foi o sustentáculo para muitas culturas. É de fácil utilização e possui funções que atendem ao homem até os dias de hoje. A madeira foi utilizada como material de construção para veículos de transporte. Foi muito importante para os países dominarem os mares e expandirem seus territórios.

A madeira tem um enorme valor econômico e ajuda no desenvolvimento industrial de muitos países. Na década de 70 do século passado, mais que qualquer outro produto, a madeira foi utilizada como material de construção, (BODIG, JAYNE – 1993).

A madeira está intimamente relacionada com a sociedade humana e qualquer ajuste de uma das partes leva a um reajuste de outra parte. É um elemento importante, sobretudo numa época de crise energética e preocupação ambiental, pois é um material que consome menor energia durante seu beneficiamento.

A madeira por ser de origem natural apresenta características singulares. Trata-se de um material de natureza complexa, multicomponente, higroscópico, anisotrópico, heterogêneo, descontínuo, inelástico, fibroso, poroso, biodegradável e renovável. A estrutura fibrosa da madeira é a origem de suas características anisotrópicas, pois a madeira possui para esforços aplicados na direção das fibras, elevada resistência à tração e comportamento pobre para esforços aplicados transversalmente.

As características físicas e químicas da madeira são aspectos fundamentais que tem grande influência no produto final, sobretudo porque nem todas as espécies reagem favoravelmente com o cimento Portland devido à quantidade de extrativos que podem estar presentes na madeira (ALBERTO, et al. 2000).

A - Características físicas da madeira

A densidade da madeira, segundo IWAKIRI (2001), deve ser de média a baixa, para assegurar a razão de compactação da chapa dentro de níveis adequados para a densificação e consolidação do material.

As dimensões das partículas exercem influência marcante sobre as propriedades das chapas, sobretudo quando se referem à flexão. A dimensão ótima das partículas deve estar entre 2 a 20 mm de comprimento e 0,2 a 2,5 mm de largura por 0,3 a 0,9 mm de espessura (IWAKIRI, 2001).

Outro fator no qual o tamanho da partícula exerce influência é no consumo de cimento, pois quanto maior a superfície específica das partículas maior a quantidade de pasta de cimento para envolvê-las e conseqüentemente maior a quantidade de água para essa pasta.

Essa característica que leva a um maior consumo de cimento leva também a uma maior homogeneidade do compósito, uma vez que haverá maior quantidade de pasta de cimento.

Outro aspecto que pode ser considerado, citado por NEVILLE (1997), é que partículas menores que 150 μm tendem a atuar como lubrificantes na mistura facilitando a trabalhabilidade da mesma. Por isso o método de dosagem através da área específica não é recomendado.

O tamanho pequeno das partículas leva a uma possível redução da densidade e conseqüente redução da resistência, pois é possível que haja um aumento na quantidade de ar aprisionado. Mas isso é para o caso do agregado mineral. Para a

madeira o efeito não pode ser considerado devido à sua própria característica celular que faz com que alguns vazios não sejam preenchidos pela pasta de cimento.

SOROUSHIAN et al. (1998) utilizando fibra de celulose proveniente da polpa do papel kraft moldou corpos de prova variando o teor de fibras buscando maximizar a resistência a flexão. A figura 12 mostra o resultado desse estudo.

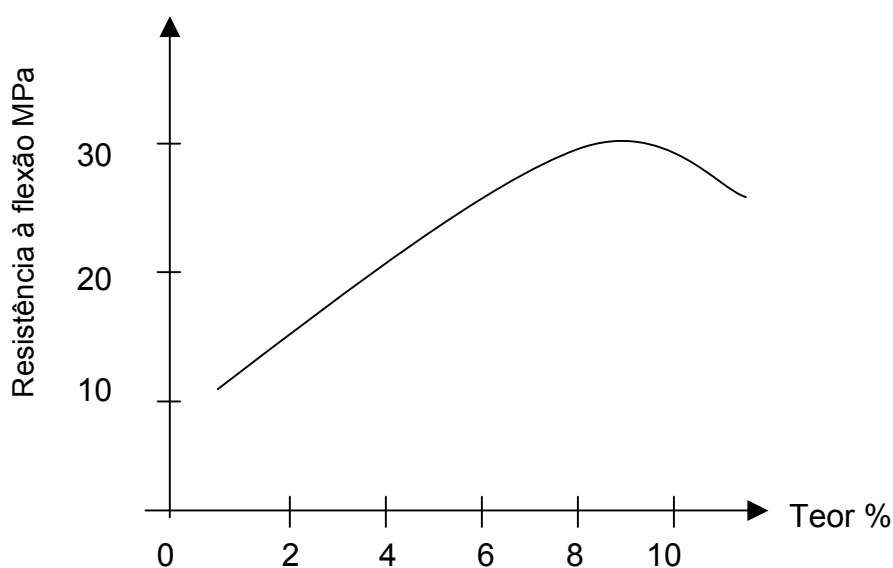


FIGURA 12 – RELAÇÃO ENTRE TEOR DE FIBRAS E RESISTÊNCIA À FLEXÃO
FONTE: SOROUSHIAN et al. 1998

O gráfico apresentado na figura 12 mostra que o teor de 8% de teor de fibras forneceu resistências superiores a 30 MPa o que é um valor considerável considerando que é muito próximo daquele obtido com argamassas de cimento e areia.

Cabe observar, no entanto, as características das partículas adotadas pelo autor do referido trabalho. A tabela 6 apresenta a classificação granulométrica dessas fibras, o comprimento em milímetros dos intervalos adotados para a classificação e sua distribuição percentual em função do peso retido. Essa forma de classificação permite estabelecer uma curva granulométrica dessa distribuição. Essa curva será utilizada para comparar com a curva granulométrica do pó de madeira utilizado nesse trabalho.

TABELA 6 – EXEMPLO DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Tamanho (mm)	DISTRIBUIÇÃO DO PESO %		
	P. radiata	E. Regnans	papel
<0,2	2,6	2,0	6,6
0,2 – 0,6	4,0	12,8	21,2
0,6 – 1,2	9,1	74,2	40,0
1,2 – 2,0	18,0	9,1	15,3
2,0 – 3,0	28,0	1,5	5,2
3,0 – 4,0	25,0	-	1,0
4,0 – 5,0	11,0	-	-
>5,0	3,0	-	1,9

FONTE: SOROUSHIAN et al. 1998

Plotando em um gráfico os dados da tabela 6 pode-se observar o comportamento da distribuição granulométrica desse material. (Figura 13).

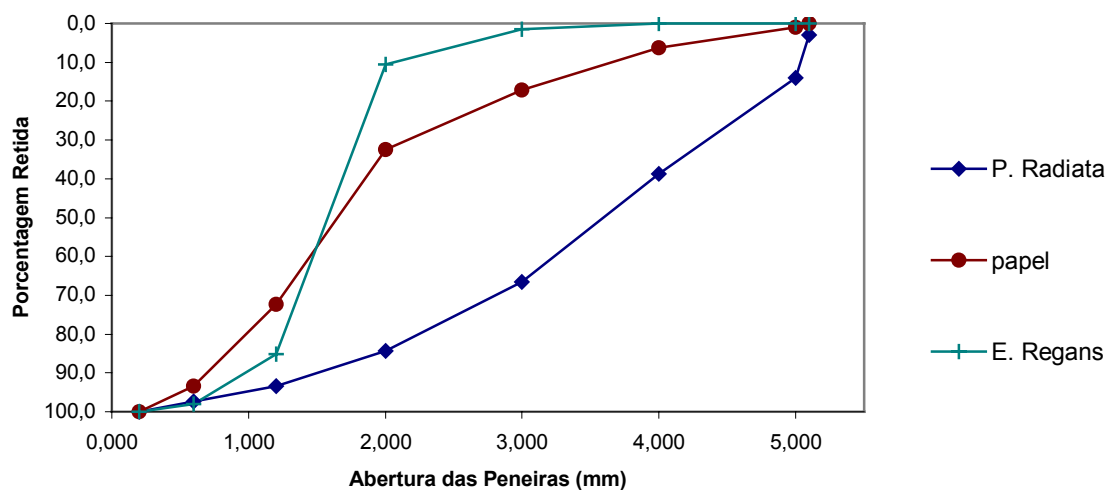


FIGURA 13 – CURVA GRANULOMÉTRICA

FONTE: SOROUSHIAN et al. 1998

Observa-se na figura 13 que a distribuição apresenta-se mais uniforme no tamanho das fibras para o material proveniente do papel reciclado bem como para o

material proveniente do *P. radiata* e um pouco menos uniforme para o proveniente do *E. regnans*, conforme apresentado pelo autor.

Esse estudo é comparado ao estudo desenvolvido por GEIMER et al. (1998) que, conforme figura 14, varia a relação entre a densidade da madeira, a razão cimento madeira e o fator água cimento. Observa-se nesta figura que existe uma relação linear entre a densidade da madeira e o fator cimento madeira para ambos fatores água/cimento adotados pelo autor em seu experimento.

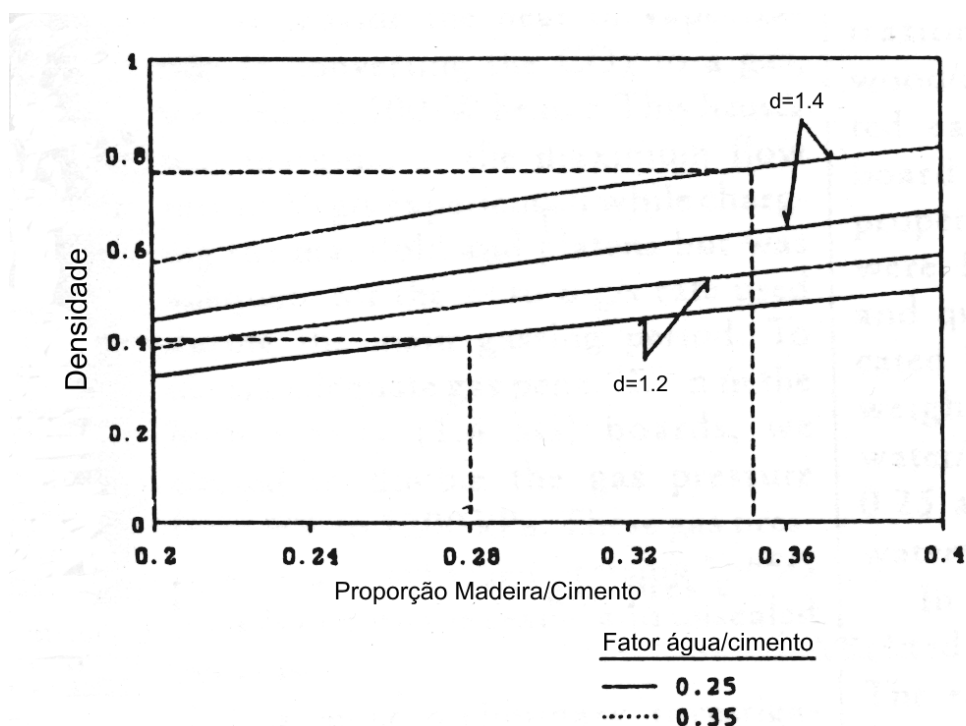


FIGURA 14 – RELAÇÃO ENTRE O FATOR CIMENTO MADEIRA E A DENSIDADE

FONTE: GEIMER, R. L. et al. – 1994

BLANKENHORN et al, (1994) apresenta por sua vez o seguinte resultado para a relação entre a resistência à compressão e o teor de madeira/cimento, obtendo os seguintes resultados, conforme figura 15. De forma evidente verifica-se que a resistência à compressão decresce com o aumento de teor de madeira, para a espécie e tamanho de partículas adotadas pelo autor.

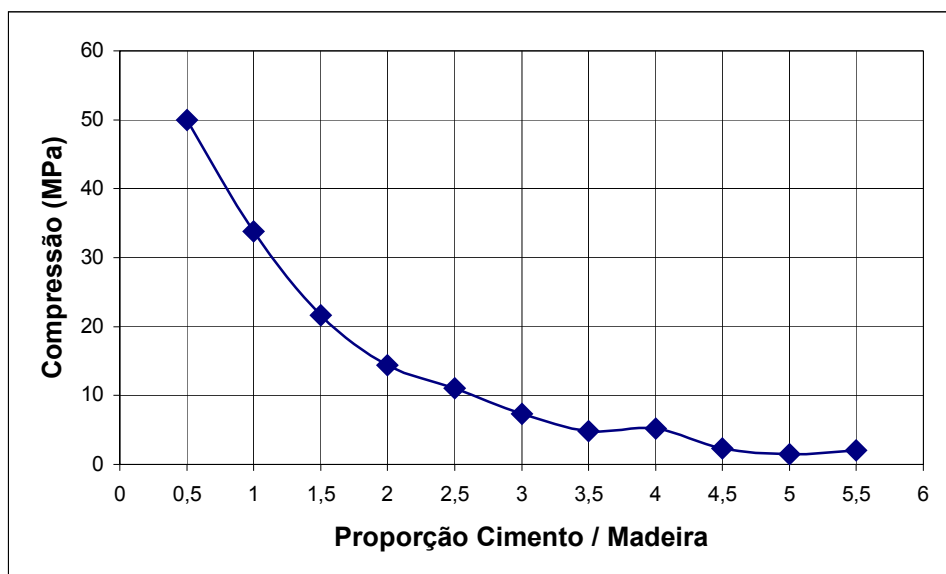


FIGURA 15 – RELAÇÃO ENTRE O TEOR CIMENTO-MADEIRA E A COMPRESSÃO

FONTES: BLANKENHORN et al, 1994

B - Características químicas da madeira

A composição da madeira é aproximadamente 50% carbono, 44 % oxigênio e 6% de hidrogênio com uma média de cinzas de 0,2 a 0,3 % contendo no máximo 0,1% de nitrogênio. O conteúdo de cinzas é um indicador dos constituintes minerais os quais podem ser o cálcio, magnésio, carbonatos, oxalatos e algumas vezes cristais de sílica. A tabela 7 mostra o percentual de cada um dos componentes da madeira em função de seu gênero.

TABELA 7 – COMPONENTES DA MADEIRA

MADEIRA	CARBONO %	HIDROGÊNIO %	OXIGÊNIO %
Coníferas	63 – 67	5 - 6	27 - 32
Folhosas	59 – 60	6 - 8	33 - 34

Os componentes das paredes celulares são os elementos estruturais que caracterizam as propriedades físicas da madeira. Os extrativos às vezes afetam a massa específica e a umidade de equilíbrio e indiretamente outras propriedades físicas.

Pela complexidade da composição molecular da madeira, seu estudo é feito através das substâncias que a constituem. As principais substâncias são:

- celulose
- hemicelulose
- lignina
- extrativos

B1 - Celulose

A celulose é o principal componente da parede celular. É o produto orgânico mais abundante na natureza. É um dos poucos componentes que mantém a mesma estrutura para as mais diversas aplicações; madeira, tecidos, entre outros.

Estruturalmente a celulose é o mais simples dos componentes da parede celular; é um polímero linear com unidades de glicose, cujo grau de polimerização da molécula de celulose pode variar de poucas moléculas a mais de 15000 unidades. No entanto está entre os polissacarídeos cuja compreensão é ainda incompleta. Esse fato se deve, sobretudo ao seu comportamento. Anselm Payen introduziu o termo celulose em 1842 para denominar uma estrutura neutra de polissacarídeos, componente do tecido da planta. Porém, mais recentemente a celulose é definida como um homopolímero da anidroglicose. (ATALLA, 1992).

A natureza incomum da celulose pode ser caracterizada por sua relação com a água, ou seja: sua estrutura primária é composta por três grupos de hidroxilas onde normalmente seria de se esperar que fosse solúvel em meio aquoso. Contudo a celulose é essencialmente insolúvel. A figura 16 apresenta um exemplo dessa molécula.

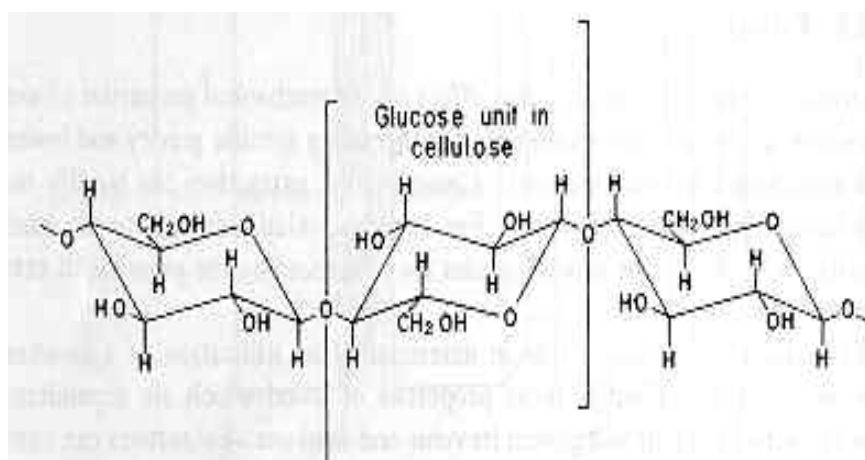


FIGURA 16 – MOLÉCULA DE CELULOSE

FONTE: BODIG e JAYNE, 1993

A cadeia de celulose possui uma região cristalina e uma região amorfa, nas extremidades. No entanto, sob efeito da temperatura, a cristalinidade da celulose aumenta consideravelmente (SCBHUIYAN et al. 2000). Esse aumento da cristalinidade da celulose pode auxiliar na interação com o cimento pois esse também forma cristais durante sua pega.

B2 - Hemicelulose

A fração da hemicelulose na madeira é aproximadamente 30 % do total sendo composta de polímeros de carboidratos, a xilose e a manose que contém polissacarídeos. O conteúdo de hemicelulose varia, dependendo se a madeira é mole ou dura. Pode-se afirmar que a hemicelulose está engastada na lignina, enroladas entre si como cordas amarradas. Esse modelo apresenta ligações covalentes e pontes de hidrogênio entre seus componentes.

A hemicelulose aparece na madeira como moléculas individuais. Como consequência, está mais associada à lignina que a celulose e aparece no estado amorfo. O estado amorfo da hemicelulose é devido ao fato de não formarem cadeias da mesma forma que a celulose. O fato de não formarem cadeias, possibilita a formação de pontes de hidrogênio o que proporciona resistência ao ataque químico. A tabela 8 indica as principais diferenças entre a celulose e a hemicelulose.

TABELA 8 – COMPARAÇÃO ENTRE A CELULOSE E A HEMICELULOSE

CELULOSE	HEMICELULOSE
Constituída por uma única unidade	Constituída por várias unidades
Grau de polimerização elevado	Grau de polimerização baixo
Forma fibras	Não forma fibras
Possui regiões cristalinas e amorfas	Só possui regiões amorfas
É lentamente atacada por ácidos	Sofre ataque rápido por ácidos

B3 - Lignina

Ligninas são substâncias de estruturas complexas, podendo ser encontradas nas plantas superiores. Juntamente com a celulose as ligninas são substâncias abundantes na face da terra. A lignina é um polímero tridimensional com um arranjo não ordenado constituindo o terceiro mais importante componente da parede celular.

É um polímero fenólico, diferente dos carboidratos. Proporciona rigidez a parede da célula e atua como agente de ligação entre as células, criando uma estrutura

resistente ao impacto, compressão e flexão. Pode-se considerar a lignina como um produto final do metabolismo da planta, pois quando o processo de lignificação é finalizado, ocorre a morte da célula, formando por sua vez o tecido de resistência.

Os tecidos lignificados resistem aos ataques de microorganismos pois há uma redução da permeabilidade à água. A lignina presente nas paredes celulares está sempre associada à hemicelulose através da interação física e através das ligações covalentes.

B4 - Extrativos

Os extrativos têm pouco ou nenhum efeito direto sobre as propriedades mecânicas da madeira. No entanto podem ser responsáveis pelo aumento da massa específica e alteração no ponto de equilíbrio da umidade. Dessa forma os extrativos podem, indiretamente alterar as propriedades mecânicas.

Os extrativos podem influenciar na utilização comercial da madeira. Extrativos podem determinar a cor, odor e durabilidade da madeira uma vez que alguns extrativos repelem os insetos. No trabalho com compósitos, alguns componentes da madeira são prejudiciais a cura do cimento, entre eles cabe citar:

- Polioses (folhosas)
- Amidos, taninos, açúcares simples
- Carboidratos solúveis em água

A quantidade desses componentes na madeira varia tanto na composição da árvore quanto na época de corte. A percentagem máxima desses componentes é de 1% para os açúcares, 2% para os taninos e 3% de óleos. Os extrativos podem ser classificados conforme figura 17:

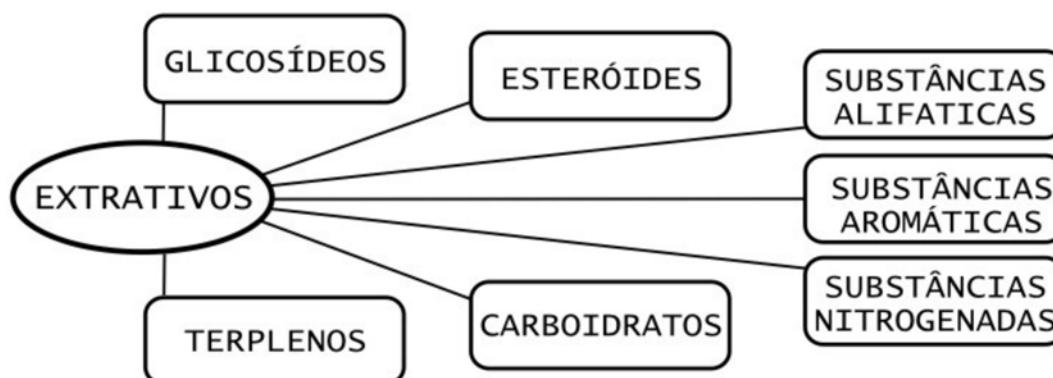


FIGURA 17 – EXTRATIVOS NA MADEIRA
 FONTE: FENGEL e WEGENER, 1984

C - Distribuição dos constituintes químicos

A constituição química básica da madeira não é distribuída uniformemente entre as camadas celulares ou entre as células. A figura 18 apresenta o diagrama que ilustra a distribuição da lignina, da hemicelulose e da celulose através da parede celular.

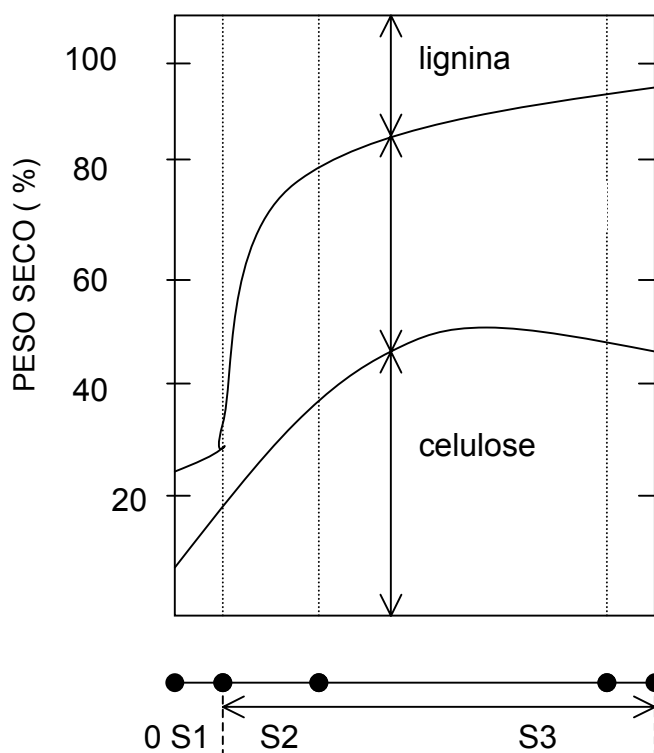


FIGURA 18 – DISTRIBUIÇÃO DOS CONSTITUINTES ATRAVÉS DA PAREDE CELULAR

FONTE: BODIG e JAYNE, 1993

Observa-se no diagrama da figura 18, que a lamela média é praticamente composta somente por lignina. Considerando a divisão entre a parede primária e a secundária, as porcentagens podem diferir significativamente.

D – O Gênero Pinus

A madeira do gênero *Pinus sp* se caracteriza por apresentar baixa resistência à flexão estática, a compressão paralela à grã e baixa massa específica. Essas características facilitam o trabalho de desdobro permitindo sua aplicação nos mais diversos produtos. Possui cor clara com lenho inicial de crescimento mais rápido e por isso paredes mais finas. O formato de suas células é arredondado; possui também a presença de canais resiníferos.

Vários municípios da região sul do Brasil vivem da exploração da madeira, sobretudo da madeira reflorestada. Pela facilidade e rapidez no crescimento o *Pinus sp* é o gênero escolhido para boa parte dos reflorestamentos. É comum a distribuição pelas prefeituras de mudas desse gênero para o plantio. A grande vantagem dessa espécie é seu rápido crescimento o que garante uma boa produtividade.

O consumo de *Pinus sp* no Brasil teve um grande salto na década de 90 passando de 19 milhões de m³ por ano para 42 milhões de m³ em 2001 sendo a indústria de serrados o principal segmento consumidor no país. A tabela 9 relaciona o consumo de toras de pinus no Brasil. (TOMASELI e TUOTO, 2004).

TABELA 9 – CONSUMO DE TORAS DE PINUS NO BRASIL (2001)

SEGMENTO	CONSUMO (1000 m ³)	Participação
Celulose e papel	12000	29 %
Painéis reconstituídos	4000	9 %
Madeira serrada	20000	48 %
Compensado	4000	9 %
Outros	2000	5 %
Total	42000	100 %

FONTE: TOMASELI e TUOTO, 2004

A madeira serrada gera uma grande quantidade de resíduos que são atualmente reaproveitados de diversas formas e por várias indústrias dentre as quais pode se citar; as indústrias de painéis do tipo MDF, as indústrias de aglomerados e chapas afins e as empresas que transformam esses resíduos em pó de madeira para que junto a outros aglomerantes forneçam outra aplicação a esse material.

2.2.3 A água

O processo de hidratação do cimento portland é complexo, pois envolve um sistema de componentes múltiplos e uma série de reações químicas com a água que ocorrem simultaneamente. O processo de hidratação do cimento depende de vários fatores, entre os quais pode-se citar:

- a composição do cimento;
- a finura do cimento;
- a temperatura de cura;

- a presença de aditivos;
- a presença de adições;
- o fator ou a relação água/cimento.

A quantidade de água necessária para reagir com o cimento depende da superfície específica do cimento, conforme pode-se observar na figura 19.

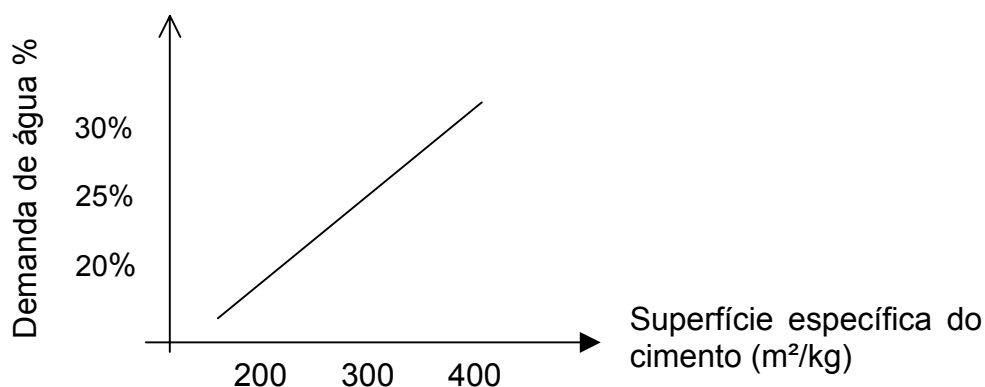


FIGURA 19 – RELAÇÃO SUPERFÍCIE ESPECÍFICA & DEMANDA DE ÁGUA

FONTE: LAWRENCE, 2001

A quantidade de água total para reagir com os componentes do cimento sob condições específicas pode ser de 23%, isto porque para certos tipos de cimentos essa quantidade pode chegar a 18%. No entanto, na prática, não se consegue essa hidratação completa pois, quando a água é adicionada ao cimento, formam-se o gel (cristais de hidróxido de cálcio), alguns compostos menos importantes, formando os vazios intersticiais.

Assim a água retida no gel não participa da reação com os produtos anidros, necessitando de mais água. De acordo com vários autores, a quantidade de água para a hidratação completa do cimento é cerca de 50% do peso de cimento. Mesmo assim, somente sob condições laboratoriais, pois na prática a hidratação vai ocorrendo ao longo do tempo.

Pela regra estabelecida por Duff Abrams em 1919 a resistência pode ser determinada como:

$$F_c = \frac{K_1}{K_2^{a/c}}, \quad [1]$$

Onde F_c é a resistência do concreto ou argamassa; K_1 e K_2 são constantes empíricas e a/c é a relação (ou fator) água cimento. (NEVILLE, 1997)

Observa-se através dessa fórmula que a resistência diminui com o aumento da quantidade de água adicionada. A figura 20 ilustra graficamente esta relação.

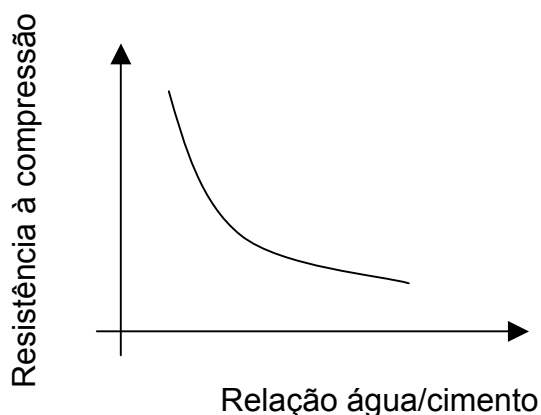


FIGURA 20 – RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA E O FATOR ÁGUA CIMENTO

FONTE: NEVILLE, 1997

Deve-se considerar que outros fatores também influenciam na resistência. A exemplo disso pode-se citar a forma de adensamento, tipo de cura e sobretudo a massa específica relativa do produto. Essa massa específica está relacionada com o número de vazios existente no compósito. No caso do concreto e das argamassas esses vazios são retirados por meio da vibração, no qual um dos indicadores de um bom adensamento é o número de bolhas que aparecem na superfície. Quando elas cessam, indica que o concreto está bem vibrado, adensado.

No caso de compósitos feitos com madeira isso não ocorre devido à densidade da madeira, sua constituição e sobretudo em função da forma de adensamento. O comportamento para concretos e argamassas é o mesmo quando se relaciona a massa específica aparente e a resistência relativa, conforme se observa na figura 21.

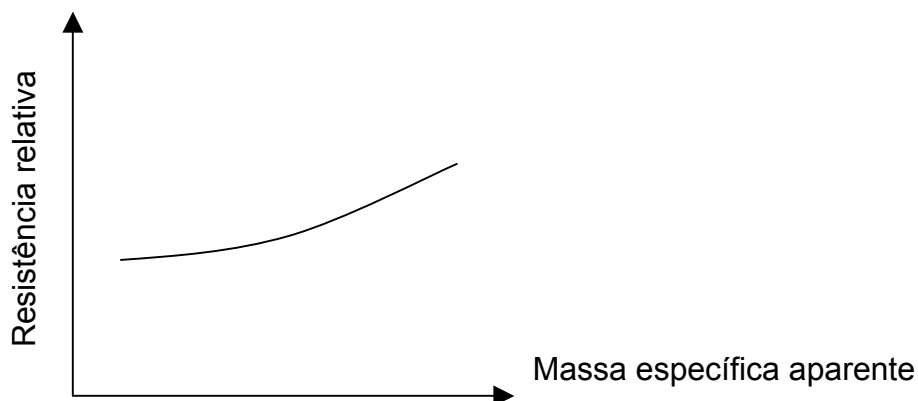


FIGURA 21 – RELAÇÃO ENTRE A MASSA ESPECÍFICA E A RESISTÊNCIA

FONTE: NEVILLE, 1997

Para o processo de produção de chapas deve-se considerar a água presente na madeira, devendo-se adiciona-la até o ponto de saturação das fibras pois, caso contrário parte dessa água pode deixar de reagir com o cimento. (SIMATUPANG, 1994). Dessa forma a equação desenvolvida para definir a quantidade total de água a ser adicionada no compósito é:

$$\text{Água} = 0,35C + (0,30 - TU)M \quad [2]$$

Onde: C = cimento medido em gramas
TU = teor de umidade da madeira
M = massa da madeira em gramas.

O resultado será obtido em gramas.

A água fornecida pela rede pública, utilizada neste trabalho, contém o cloro e outras substâncias em seu tratamento, contudo, seu efeito é pequeno ou quase inexistente em função da baixa dosagem dessas substâncias.

Cabe observar ainda que conforme ZOULALIAN et al. (1994), comparando a mistura madeira cimento ao concreto, mais água é necessária pois a madeira é higroscópica por natureza, sobretudo trabalhando com finos. No caso trabalha-se com pó de madeira, o que caracteriza bem essa situação.

O fator água cimento tem importante influência nas propriedades do compósito. SOLÓRZANO, (1994) em seu artigo mostra que a resistência à flexão reduz de 8,2 MPa para 3,7 MPa, quando se altera o fator água cimento de 0,635 para 0,235. Isso ocorre dentro das condições de ensaio deste autor, até porque para argamassas de cimento e areia ou somente o cimento, a relação é inversa conforme NEVILLE (1997).

A - A cura em câmara climatizada

Considerando que nem todo o cimento é hidratado após a adição da água é importante realizar a cura desse compósito. A cura do cimento é lenta envolvendo um complexo processo de reações sobretudo, quando esse processo envolve compósitos contendo lignoceluloses no agregado. O processo de cura do compósito pode ser definido como o procedimento a que se recorre para promover a hidratação do cimento e consiste em controlar a temperatura e a saída ou entrada de umidade no compósito. A hidratação em velocidade máxima pode ocorrer somente com a saturação máxima de seus vazios com água. Na prática fica difícil obter essa

saturação sem um procedimento específico. A cura no meio ambiente está sujeita a outras variáveis como a variação da umidade relativa do ar, a velocidade do vento, a temperatura, entre outras. Também a forma, o tamanho da peça, o fator água cimento e aditivos exercem influência no resultado final da cura a vapor.

Entre os processos de cura em câmara climatizada pode-se citar aquela com aspersão de água em determinados intervalos de tempo, a cura a vapor à pressão atmosférica e a cura a vapor sob pressão.

A cura em câmara climatizada leva em consideração que o cimento aumenta sua resistência inicial mais rapidamente com a temperatura permitindo que o produto final possa ser manuseado e liberado das formas com um tempo reduzido. Isso pode representar importante vantagem econômica, sobretudo quando se trabalha com pré-moldados. Deve-se considerar, no entanto, que em longo prazo a resistência final é menor que aquela que seria obtida com a cura em temperaturas menores. (NEVILLE, 1997).

A figura 22 apresenta a relação entre a resistência à compressão e a idade em horas de corpos de prova de concreto, para 6 temperaturas distintas de cura a vapor.

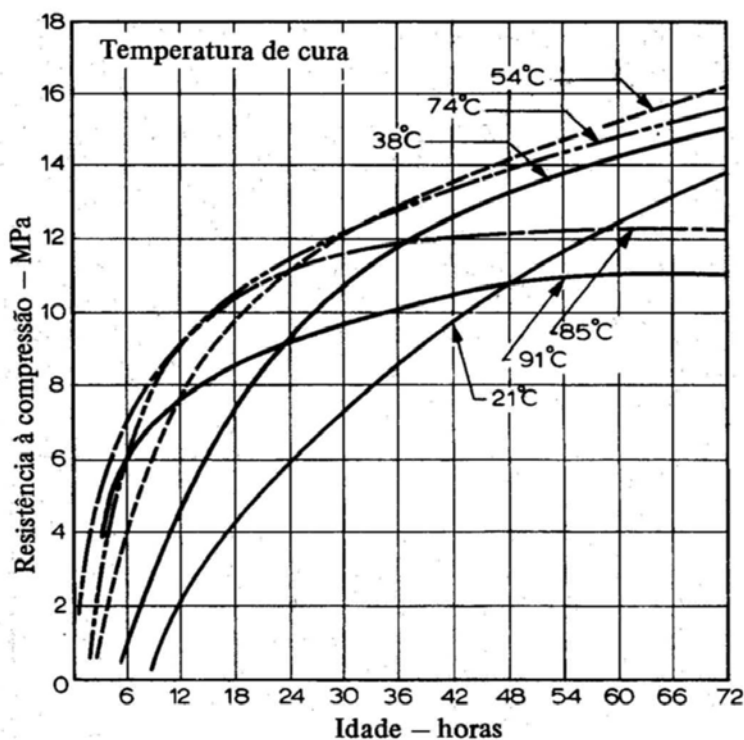


FIGURA 22– RESISTÊNCIA DO CONCRETO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE CURA A VAPOR

FONTE: NEVILLE, 1997

Observa-se na figura 22 que resistências maiores foram obtidas num prazo menor, mas que para algumas temperaturas de cura em longo prazo a resistência diminuiu.

B - Outros processos de cura

Outro processo que acelera a cura de compósitos a base de cimento é o tratamento com o gás dióxido de carbono. A vantagem da carbonatação é o aumento da durabilidade do compósito, pois a carbonatação neutraliza o hidróxido de cálcio reduzindo assim a alcalinidade do meio e como consequência protegendo as partículas de madeira.

A carbonatação é um processo rápido, no qual o hidróxido de cálcio situado na superfície reage em segundos e aquele que se situa mais profundamente reage em poucos minutos. A carbonatação protege o compósito criando superfícies mais compactas reduzindo a variação do teor de umidade do produto, aumentando assim sua durabilidade. (SIMATUPANG et al. 1995).

A proteção dada pelo tratamento com o dióxido de carbono foi verificada por MOSLEMI et al. (1983) mostrando em seu trabalho que painéis com esse tratamento tiveram poucas alterações em suas propriedades quando submetidos ao ciclo congelamento e degelo e também ao ciclo de molhagem e secagem. PABLO et al. (1994) também conseguiram melhoras com o tratamento com o CO_2 mas utilizando em chapas do tipo Excelsior. Nesse tipo de chapa conseguiram melhorar com esse tratamento, o módulo de ruptura em 40% quando comparado à chapa sem tratamento.

O mesmo resultado foi obtido por SOROUSHAN et al. (1994) que buscaram através do tratamento com o gás carbônico uma redução do cálcio livre nos vazios do compósito. Caso contrário, os ciclos de molhagem e secagem acabam dissolvendo o hidróxido de cálcio que está ligado ao cimento e o íon Ca^{++} se desloca até o interior das fibras de celulose e aí reage com o dióxido de carbono. Essa reação leva a formação, ainda no interior da fibra de celulose, de carbonato de cálcio. Esse fato leva à petrificação da fibra de celulose o que torna o compósito frágil reduzindo consequentemente sua durabilidade. A solução proposta por esses autores, para esse caso, foi a utilização de adição de micro-sílica ou a utilização de cimento com teores reduzidos de hidróxido de cálcio.

2.2.4 Aditivos

Aditivos são produtos que são adicionados à mistura com a finalidade de acelerar ou retardar a hidratação e cura do cimento. Distinguem-se das adições pois estas são adicionadas durante a fabricação do cimento. Os aditivos são adicionados durante a mistura do compósito.

Um dos principais objetivos da aplicação de aditivos é o de procurar reduzir o tempo de maturação dos compósitos em geral. A cura do cimento é lenta e processos para acelerar essa cura têm sido desenvolvidos, como por exemplo o estudo feito por SOROUSHIAM et al. (2003). Nesse trabalho os autores utilizam a pressão a quente do compósito e o tratamento com o dióxido de carbono cuja interação leva a uma redução do tempo de cura.

Os aditivos estão se tornando substância comum e de acordo com EDMEADES, (1998) houve um aumento de 12% para 50% no uso de aditivos em todo o concreto produzido nos países industrializados. Podem ser classificados de acordo com a solubilidade na água, conforme tabela 10 .

TABELA 10 – CLASSIFICAÇÃO DOS ADITIVOS USANDO O CRITÉRIO DA SOLUBILIDADE

SOLÚVEIS EM ÁGUA	INSOLÚVEIS
Aceleradores	Plastificantes, trabalhabilidade
Retardadores/redutores de água	Partículas sólidas
Fluidificantes	Líquido dispersante
Incorporador de ar	Emulsões
Superplastificantes	Pigmentos
Impermeabilizantes	

FONTE: EDMEADES e HEWLETT, 1998

Já de acordo com a ASTM C 494-(1992) são classificados em:

- Tipo A – plastificantes;
- Tipo B – retardadores;
- Tipo C – aceleradores;
- Tipo D – plastificantes retardadores;
- Tipo E – plastificantes aceleradores;
- Tipo F – superplastificantes;
- Tipo G – superplastificantes retardadores.

Os aditivos incorporadores de ar são utilizados em situações que requerem proteção contra o ciclo congelamento e descongelamento. Compreendem os grupos dos surfactantes que agem na interface água-ar-cimento segurando o ar em forma de minúsculas bolhas. Essa é uma das características daquelas substâncias que possuem cadeia de hidrocarbonetos ou que terminam num grupo polar hidrofílico. (EDMEADES, 1998)

Quando a argamassa ou o compósito necessitam reduzir a quantidade de água, aditivos redutores de água são adicionados. As principais substâncias utilizadas para este aditivo são os sais lignosulfonados ou os ácidos hidrocarboxílicos. Os sais lignosulfonados são obtidos pela reação do ácido sulfúrico no processo de obtenção de polpa da madeira, para fabricação de papel.

A classe de aditivos que influencia a velocidade de hidratação do cimento reduzindo o tempo de cura e algumas vezes aumentando a resistência, são os aceleradores que podem ser divididos em dois tipos:

1. Os aceleradores que afetam principalmente a fase do aluminato tricálcico (C3A). São geralmente álcalis, por exemplo o silicato de sódio, ajudando na dissolução da sílica e da alumina e interferindo na reação do C3A com o gesso.
2. Os aceleradores que afetam principalmente a fase alita (C3S), fase essa que aumenta a resistência inicial. São geralmente ácidos ou sais provenientes de ácidos que ajudam na dissolução do cálcio.

A - Aditivos Aceleradores

Os produtos mais utilizados como aceleradores de cura são: cloreto de cálcio, cloreto férrico, cloreto de magnésio, sulfato de alumínio, silicato de sódio. O hidróxido de sódio é utilizado no pré-tratamento de partículas para a retirada de extrativos da madeira que são prejudiciais à cura do cimento. (ABDELRAZIG et al., 1990).

Os aditivos podem ser sólidos ou líquidos, e têm por função modificar as propriedades normais do concreto e/ou compósitos, proporcionando melhoras físicas e econômicas.

A principal função destes aditivos é acelerar a evolução da resistência inicial do compósito durante o endurecimento, embora possam também acelerar a pega do cimento. Podem ser utilizados quando o material compósito é aplicado em baixas temperaturas (2 °C a 4 °C), ou em concretos pré-moldados, (devido à necessidade de

desforma rápida) e em serviços de reparo urgente. Os aditivos geralmente utilizados são:

1. Cloreto de cálcio (CaCl_2) – É o mais comum dos aditivos, é eficiente para acelerar a hidratação dos silicatos de cálcio, principalmente o C3S, isso possivelmente devido a uma pequena variação da alcalinidade da água dos poros ou como um catalisador nas reações de hidratação. O cloreto de cálcio é barato e eficiente, melhora a resistência à erosão e à abrasão em todas as idades, porém a presença de íon cloreto nas proximidades da armadura provoca uma corrosão intensa. Devido a isso muitos códigos e normas proíbem o cloreto de cálcio em concretos em que há o uso do aço.
2. Cloreto de Magnésio (MgCl_2) – Tem efeito semelhante do CaCl_2 , mas em menor intensidade. Os íons de cloro possuem mobilidade suficiente para penetrar nas partículas de silicato, acelerando a dissolução do cálcio. (EDMEADES, 1998)
3. Cloreto de Bário – Atua como acelerador somente em idades e em temperaturas mais altas.
4. O Sulfato de alumínio – atua como acelerador de pega e é melhor que os aditivos a base de cloreto para algumas espécies de madeira.

Entre os pesquisadores que têm utilizado o cloreto de cálcio como aditivo em compósitos de cimento madeira pode-se citar MOSLEMI et al. (1983), que avaliando a utilização desse aditivo mostrou que há uma melhora significativa na pega do cimento observando, contudo, que esse fato não ocorre para qualquer espécie de madeira. A melhora da pega do cimento segundo esses autores se deve ao aparecimento de fortes ligações entre a madeira e o cimento devido à ação do cloreto de cálcio. Suas observações indicam que o CaCl_2 realça as formações cristalinas aumentando por sua vez o encadeamento entre o cimento e as partículas de madeira.

Como exemplo de aditivos aceleradores que não são a base de cloro pode-se citar sódio aluminato, o formato de cálcio e a trietanolamina. Alguns aditivos como o formato de cálcio, quando combinados com nitrito de sódio são utilizados quando se procura obter a vantagem da proteção de armaduras contra a corrosão. (EDMEADES, 1998). A tabela 11 relaciona alguns aditivos químicos com o tempo de pega para uma mesma trabalhabilidade da mistura.

TABELA 11 – EFEITO DE ADITIVOS QUÍMICOS NO TEMPO DE PEGA DO CIMENTO.

ADITIVO QUÍMICO	TEMPO DE PEGA (H:MIN)
Controle	4:35
Sulfato de alumínio	3:20
Cloreto de cálcio	3:30
Formato de cálcio	3:30
Nitrato de sódio	4:20
Tiocianato de sódio	4:05
Tiosulfato de sódio	4:30
Trietanolamina	Falsa pega

FONTE: EDMEADES, 1998

Cabe observar, contudo, que segundo SIMATUPANG et al. (1994), os melhores aditivos para reduzir o tempo de pega dos compósitos de cimento-madeira são aqueles a base de carbonato de potássio, (K_2CO_3). Ocorre, no entanto, que esses aditivos têm custo muito elevado e o que os autores observam é que a utilização do aditivo carbonato de hidrogênio e potássio ($KHCO_3$) juntamente com o carbonato de potássio reduzem um pouco esse custo.

Por sua vez WEI et al. (1999) analisando a utilização de aditivos em compósitos de cimento e madeira mostraram que os cloretos de cálcio, ferro e estanho produziram elevada temperatura de hidratação, acima de $50^\circ C$ com 4% de adição baseado na massa de cimento. A tabela 12 apresenta os resultados obtidos por WEI et al. (1999), na utilização de diversos tipos de aditivos.

TABELA 12 – EFEITO DOS ADITIVOS NA PEGA DO CIMENTO EM COMPÓSITOS

ADITIVO QUÍMICO	TEMP. ($^\circ C$)	TEMPO PEGA (H)	MOR (MPA)	LIGAÇÃO INTERNA(MPA)
$CaCl_2$	54,3	8,7	13,26	0,69
$FeCl_3$	54,0	15,7	12,09	0,62
$SnCl_2$	50,0	17,8	7,63	0,52
$AlCl_3$	47,2	8,3	6,78	0,56
$Al_2(SO_4)_3$	44,3	14,0	7,65	0,58
$MgCl_2$	41,5	13,0	6,59	0,43
Cimento+ madeira	40,8	10,2	3,53	0,26

FONTE: WEI, 1999.

MEHTA e MONTEIRO (1994) observaram os efeitos dos aditivos a base de cloro conforme apresentado na tabela 13.

TABELA 13 – CARACTERÍSTICAS OBTIDAS NO EMPREGO DE ADITIVOS A BASE DE CLORO.

NUM.	PROPRIEDADE	EFEITO GERAL
1	Pega	Reduz o efeito de pega inicial e final.
2	Resistência à compressão	Aumenta significativamente a resistência à compressão.
3	Resistência à flexão	Redução de 10% aos 7 dias
4	Resistência à tração	Pequena diminuição aos 28 dias.

FONTE; MEHTA e MONTEIRO, 1994.

Observa-se que os autores desse trabalho, WEI et al. (1999), utilizaram a razão cimento:madeira de 3:1 e o fator água cimento de 0,52, para a confecção dos painéis. Ainda, no caso do aditivo sulfato de alumínio a madeira foi tratada com o silicato de sódio NaSiO_2 antes de ser adicionada à mistura. Finalmente a madeira utilizada foi em partículas com tamanho médio superior a 5,0 cm.

Por sua vez, o sulfato de alumínio (Al_2SO_4), que tem forma de atuação semelhante a dos cloretos, aumenta a resistência à compressão do compósito. Cabe a observação de que alguns autores, a exemplo de FAN et al. (1994), utilizam o silicato de sódio juntamente com o sulfato de alumínio com a finalidade de estudar o comportamento dimensional desses compósitos submetidos a ciclos que variam a umidade e a temperatura. Na Rússia, conforme TSYPIN, (1994) essa mistura também é comumente utilizada na fabricação de painéis.

Para o estudo da reação de hidratação, ou seja, na confecção dos corpos cilíndricos, a razão cimento:madeira utilizada foi de 13:1 com 4% de teor de aditivos.

Na preocupação com a redução do tempo de pega do cimento, PASNER e KLEMARESKI, (1994) utilizaram em seus experimentos o magnésio oxifosfato que é um tipo de cimento que além de permitir a cura rápida não é inibido por extrativos existentes em algumas espécies de madeira, o que ocorre para o cimento comum. A velocidade de pega desse cimento depende, segundo os autores, da temperatura de cura podendo chegar em alguns casos até a 10 minutos para a pega total. Um valor muito significativo, considerando o tempo de pega que ocorre para o cimento comum ou até para o cimento de alta resistência inicial. Novamente, a madeira utilizada por esses autores foi de granulometria superior a 0,5 cm.

Verifica-se assim que exceto SOROUSHIAM (1994), que trabalhou com fibra de celulose e GRANDI (1995) que trabalhou com pó de madeira, os demais autores trabalharam com madeira em forma de partículas de dimensões na ordem de centímetros.

Na revisão da literatura nenhum dos trabalhos analisados utilizou o pó de madeira de origem controlada. Controle esse tanto no gênero da madeira quanto no tamanho das partículas. Entendendo-se como origem controlada a determinação prévia do tamanho de partícula desejada em função do módulo de finura e também a utilização da mesma espécie de madeira que dá origem ao material utilizado nesse trabalho.

Outros controles são efetivados durante a produção e armazenamento dessas partículas os quais cabe citar: a) O controle da umidade; b) O controle de impurezas; c) A qualidade da embalagem.

Para cada remessa de pó de madeira é emitido um laudo que acompanha a carga desse pó até a indústria que usa para a fabricação de seus produtos. O anexo I apresenta os laudos emitidos para as 4 granulometrias que foram utilizadas nesse trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Entre as restrições apontadas em outros trabalhos, está a granulometria fina que por possuir maior superfície específica, absorve mais água, restringe a trabalhabilidade e outras características que dificultam o processo de obtenção desses painéis. No entanto essa mesma granulometria fina permite que a madeira trabalhe como estruturante e como carga ao mesmo tempo. Como estruturante, fornece resistências maiores à flexão, a exemplo do que ocorre com os painéis fabricados com fibras longas. Como carga permite uma redução da quantidade de cimento, tornando o painel mais econômico.

A primeira parte desse trabalho foi realizada através da moldagem de corpos de prova cilíndricos com o intuito de caracterizar o comportamento dos componentes do compósito cimento-madeira.

A segunda parte foi realizada através da confecção de painéis, onde as propriedades analisadas foram: a absorção de água, inchamento em espessura, compressão axial, ligação interna e flexão estática.

3.1 Materiais utilizados

Os materiais utilizados para a confecção dos corpos de prova cilíndricos e painéis foram a madeira, o cimento, a água e os aditivos.

3.1.1 O pó de madeira

A madeira utilizada nesta pesquisa foi do gênero *Pinus spp*, cuja origem foi através da transformação de resíduos, ou sobras de madeira, realizado pela INBRASFAMA® (Indústria Brasileira de Farinha de Madeira).

Esse material após recebido pela empresa foi transformado em pó de madeira com a utilização de moinhos de martelo. Completada a moagem esse material foi classificado de acordo com sua granulometria e depositado em galpões protegidos das intempéries. A classificação do pó de madeira foi feita utilizando-se a série normal de peneiras, conforme NBR 5734 (1991). A figura 23 mostra o equipamento utilizado para caracterizar a granulometria do pó de madeira.



FIGURA 23 – EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA CARACTERIZAR A GRANULOMETRIA

Foram adotadas 4 granulometrias distintas para a confecção dos corpos de provas, todas elas caracterizadas como pó de madeira. Esse material foi acondicionado em sacos lacrados e mantido à temperatura ambiente até sua utilização para a realização dos ensaios.

A massa específica foi obtida através do laudo fornecido pela empresa que pode ser observado no anexo I desse trabalho. Apesar do laudo apresentar teor de umidade e distribuição granulométrica estas propriedades foram novamente determinadas em laboratório para confirmação.

A - Determinação das características físicas do pó de madeira

Após a moagem da madeira através do moinho de martelo, as mesmas são armazenadas na temperatura ambiente até o equilíbrio da umidade com o ambiente. Após esse equilíbrio foi determinada a massa específica da madeira. Isso se deve ao fato de que a massa específica altera significativamente com o estado físico da madeira. A determinação da massa específica foi realizada de acordo com procedimentos da NBR 7251 (1982) e os resultados estão apresentados no anexo I.

Para a determinação do teor de umidade foram tomadas amostras de cada granulometria, do pó de madeira, e levadas à estufa a 90°C determinando-se assim seus teores de umidade. O teor de umidade foi determinado à temperatura de 90C, em razão da provável combustão da matéria orgânica constituinte do pó em temperaturas mais elevadas.

O pó de madeira foi classificado de acordo com sua granulometria tomando-se como parâmetro o módulo de finura. O módulo de finura é definido como a soma das percentagens acumuladas na série normal de peneiras dividido por 100, conforme NBR 7217 (1982). O módulo de finura, soma das porcentagens acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normalizada, dividida por 100, é determinado de acordo com a NBR 7211 (1983). Essa adaptação da norma do concreto também é adotada por outros autores e auxilia na comparação de valores. A NBR 7217 (1982) trata da forma de determinação granulométrica dos agregados, também é adaptada para o agregado ora utilizado, ou seja, o pó de madeira.

3.1.2 O cimento

O cimento utilizado foi o CP V ARI, pelo fato de que em outros experimentos ofereceu boa compatibilidade com a madeira do pinus, conforme citado por ALBERTO et al. (2000), e também por atingir elevadas resistências em pouca idade, fato esse vantajoso pois economiza tempo. A especificação do cimento está de acordo com NBR 11578 (1990).

Os cimentos foram adquiridos em sacos de 50 kg, conforme é vendido comercialmente, permanecendo em sua embalagem original, até seu uso, uma vez que após abertos foi utilizado em menos de uma semana.

3.1.3 A água

A água utilizada foi a fornecida diretamente pela rede pública de distribuição, pela questão da economia, pois a água destilada ou tratada com fins específicos encarece a confecção desses painéis compósitos. O pH da água é 7,0 com pequenas variações e a quantidade de cloro residual na água pode variar de acordo com o local da amostra pois, quanto maior a distância do reservatório, menor a quantidade detectada. MATOSKI, et al. (1998).

Cabe observar que o teor de cloro encontrado na torneira do consumidor final não é suficiente para alterar de forma significativa as propriedades do compósito a base de cimento/madeira.

3.1.4 Aditivos químicos

Foram empregados nesse trabalho quatro aditivos químicos com o objetivo de combater o efeito retardador na pega do cimento devido aos compostos orgânicos presentes na madeira. Desses aditivos, dois são a base de cloro, ou seja: o cloreto de cálcio (CaCl_2) e o cloreto de magnésio (MgCl_2). Outros dois aditivos utilizados são o silicato de sódio (Na_2SiO_3) cujo efeito é o de mineralizar as fibras da madeira permitindo uma maior interação com o cimento. O silicato de sódio é um líquido incolor que deve ser armazenado em temperaturas maiores que 5°C , pois abaixo desse valor cristaliza tornando-se impróprio para realização de ensaios. Sua densidade é de $1,37 \text{ g/cm}^3$ e pH igual a 10, isto é levemente alcalino. Esse produto quando diluído em água com teor de 13% atua como catalisador na pega do cimento.

Os aditivos foram adquiridos no comércio e foram aqueles comumente utilizados como aceleradores em outras aplicações. O anexo II apresenta o laudo de conformidade desses produtos apresentado pela empresa que forneceu o pó de madeira.

3.2 Preparação do compósito

Os compósitos foram preparados em duas formas. A primeira delas foi em cilíndricos metálicos e a segunda foi em forma de chapas.

3.2.1 Confecção dos corpos de prova cilíndricos

As proporções adotadas (o traço) para os ensaios com corpos de prova cilíndricos foram:

- Relação cimento madeira: 13:1 (inicial)
- Fator água/cimento: 0,50 (inicial)

A quantidade adotada foi para moldar 4 corpos cilíndricos com dimensões de 50 mm (diâmetro) por 100 mm (altura). Ou seja: 975 gramas do cimento CP V ARI-RS, 75 gramas de madeira e 487,5 ml de água. A quantidade de água foi corrigida de acordo com o teor de umidade apresentado pelo pó de madeira no momento do ensaio.

Os procedimentos foram realizados de acordo com a norma NBR 5739 (1994) para determinar a resistência à compressão de corpos de prova de cimento-madeira, onde a aparelhagem utilizada foi:

1. moldes de 5 cm x 10 cm;
2. paquímetro;
3. régua metálica;
4. placa de vidro;
5. espátula metálica;
6. máquina de ensaio à compressão;
7. misturador mecânico;
8. soquete metálico.

A aparelhagem utilizada foi a prescrita na NBR 7215 (1996). Ainda, de acordo com a norma a temperatura do ar na sala de ensaios, bem como a dos aparelhos e materiais, exceto a da água, deve ser de $(24 \pm 4)^{\circ}\text{C}$. A umidade relativa do ar ambiente não deve ser inferior a 50%. a água na mistura deve ser potável e estar entre 21 e 25°C. O óleo utilizado como desmoldante deve ser mineral e de baixa viscosidade.

De acordo com a NBR 7217 (1982), a mistura desses materiais deve ser feita com o misturador na velocidade baixa durante 30s. Após esse tempo e sem paralisar a operação de mistura, inicia-se a colocação do pó de madeira tomando cuidado para que seja colocada gradualmente durante o tempo de 30 s. Imediatamente após o término da colocação do pó de madeira, muda-se a velocidade para alta misturando os materiais nesta velocidade por 30 s. Então desliga-se o misturador por 1min e 30 s. Nos primeiros 15 s, retira-se, com auxílio de uma espátula, a argamassa que ficou aderida às paredes da cuba e à pá e que não foi suficientemente misturada, colocando-a no interior da cuba. Durante o tempo restante (1 min e 15s), a mistura fica em repouso na cuba coberta com um pano limpo e úmido. Imediatamente após este intervalo, liga-se o misturador na velocidade alta, por mais um minuto.

Para o preparo dos moldes, utilizou-se fita veda rosca para garantir a estanqueidade. Untou-se toda a superfície interna e o fundo da fôrma com uma leve camada de óleo. Os moldes devem ser preparados antes de se efetuar a mistura.

O preenchimento dos moldes deve ser feito imediatamente após o amassamento e com a maior rapidez possível. Para tanto, é necessário que o recipiente que contém a argamassa esteja junto aos moldes durante o adensamento. A colocação da argamassa na fôrma é feita com o auxílio da espátula, em quatro camadas, de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 30 golpes

uniformes, com o soquete, homoganeamente distribuídos. Essa operação deve ser terminada com arrasadura do topo dos corpos de prova, por meio da régua metálica que o operador faz deslizar sobre as bordas da fôrma em direção normal à régua, dando-lhe também um ligeiro movimento de vaivém na sua direção.

Logo após a moldagem, os corpos de prova, ainda nos moldes, devem ser colocados em câmara úmida, onde devem permanecer durante 20 a 24h com a face superior protegida por uma placa de vidro plano.

Terminado o período inicial de cura, os corpos-de-prova devem ser retirados das fôrmas, devidamente identificados e imersos, separados entre si, no tanque de água (não corrente) saturada de cal da câmara úmida, onde devem permanecer até o momento do ensaio.

Desde o momento em que são retirados da câmara úmida e até o instante do ensaio de compressão os corpos de prova devem ser protegidos de maneira que toda a superfície exterior permaneça levemente úmida.

Na véspera do ensaio de compressão os corpos são capeados com enxofre e são ensaiados de acordo com NBR 5738 (1994). O capeamento consiste no revestimento dos topos dos corpos de prova com uma camada de material apropriado, com as características de aderência ao corpo de prova, compatibilidade química com o concreto, fluidez no momento de aplicação e resistência à compressão compatível com os valores obtidos em concreto. Utilizou-se de um elemento capeador para se assegurar a perpendicularidade da superfície obtida

Para a preparação da máquina de ensaio limpou-se completamente os pratos da prensa. Colocou-se o corpo-de-prova diretamente sobre o prato inferior da prensa, de maneira que ficasse rigorosamente centrado em relação ao eixo de carregamento. A velocidade de carregamento da máquina de ensaio, ao transmitir a carga de compressão ao corpo-de-prova, foi equivalente a $(0,25 \pm 0,05)$ MPa , por segundo.

3.2.2 *Comparação entre procedimentos*

Com a finalidade de verificar se existe alguma diferença nas propriedades desse compósito alterando-se a ordem de mistura dos ingredientes adotou-se dois procedimentos distintos.

O primeiro procedimento teve como ordem de mistura, o cimento, 90% da água, o pó de madeira e depois o restante da água. O segundo procedimento diferencia-se apenas pela ordem de colocação dos componentes da mistura, ou seja,

desta vez a madeira foi misturada com 90% da água e na seqüência foi adicionado todo o cimento, colocando-se o restante da água. A proposta é verificar se há diferença significativa na ordem da mistura, uma vez que a madeira, por ser porosa, absorve a água de amassamento, o que pode originar diferenças significativas de resistência. O traço da mistura foi o mesmo em ambos os casos, ou seja: $f a/c = 0,50$ e relação cimento/madeira de 13:1. Em forma de diagrama os experimentos podem ser descritos conforme figura 24

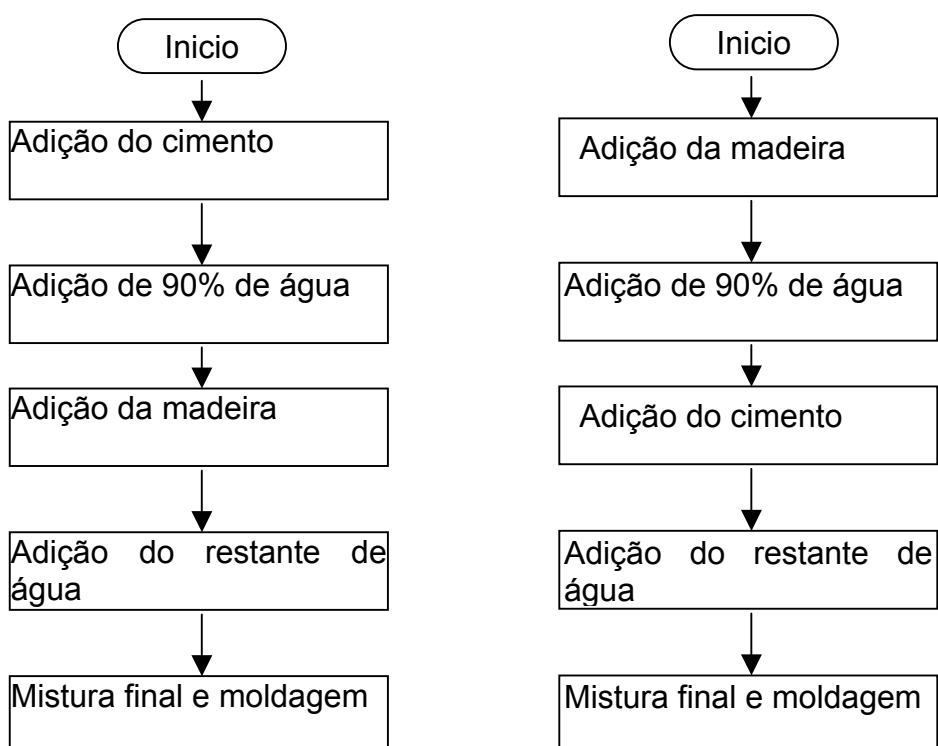


FIGURA 24 – FLUXOGRAMA DOS PROCEDIMENTOS PARA MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA

A figura 25 mostra o equipamento utilizado para a homogeneização da mistura.



FIGURA 25 – EQUIPAMENTO DE HOMOGENEIZAÇÃO DA MISTURA

Após a homogeneização o material é colocado em cilindros metálicos de 50mm X 100 mm conforme figura 26



FIGURA 26 – MOLDAGEM DO COMPÓSITO EM CILINDROS METÁLICOS

3.2.3 *Confecção dos painéis*

Os painéis foram confeccionados num sistema que lembra o sistema BISON® utilizado na Alemanha, conforme FRICK (1994). Segundo esse mesmo autor esse sistema foi originalmente desenvolvido pela própria BISON®. Esse sistema trabalha moldando painéis sob pressão, que após a carga são mantidos grampeados durante um longo período, no caso 24 horas.

Para a moldagem dos painéis adotou-se a densidade projetada de 2,0 g/cm³, dessa forma como a chapa tem aproximadamente 3000 cm³, obtém-se a quantidade de cada componente do compósito.

A semelhança de KARSTEN e SATTLER, (1994), a relação madeira cimento adotada inicialmente foi de 1:4, sendo o fator água cimento de 0,43. O teor de umidade presente na madeira foi determinado através da adaptação da NBR 7211 (1982) e como tem influência direta na quantidade de água adicionada na mistura foi realizada a correção, conforme equação [5] também utilizada por FAN et al. (1999).

$$\text{Água corrigida} = (F \text{ a/c})C + M(0,30 - TU) \quad [5]$$

Onde:

F a/c = fator água cimento;

C = quantidade de cimento em gramas;

M = quantidade de madeira em gramas;

TU = teor de umidade de madeira (%).

Para a determinação da quantidade de materiais para confecção dos painéis considerou-se a moldagem de 3 painéis simultaneamente, na qual a massa total passou a ser de 18000 gramas. Como existe uma perda de material durante sua confecção devido à aderência nas paredes da betoneira e perdas no transporte e na moldagem, adotou-se margem de erro de 4 a 6% em massa. Dessa forma a planilha de cálculo ficou:

TABELA 14 – QUANTIDADE DE MATERIAL PARA COMPOSIÇÃO DOS PAINÉIS

MATERIAL	CÁLCULO	MASSA EM GRAMAS
Cimento	Em função da massa total Dos painéis	11700
Madeira	25% da massa do cimento	2925
Água	43% da massa do cimento	5031
Correção d'água	Função teor de umidade do pó de madeira	500 a 700
Aditivo	4% da massa do cimento	468

Após a determinação do traço foi feita a pesagem dos constituintes em balança de precisão. As chapas foram moldadas de acordo com as seguintes dimensões largura de 385 mm; comprimento de 505 mm e espessura de 15 mm. O volume dessas chapas já considerando as perdas foi de 3000 cm³.

Inicialmente determinou-se toda a massa do pó de madeira necessário para a fabricação de 3 painéis, ou seja, 9000 cm³. Posteriormente pesou-se o cimento e o aditivo (4% em relação a massa do cimento) utilizado em cada etapa do experimento.

Dando seqüência, separou-se toda a água a ser utilizada, na qual foi adicionado o aditivo quando a mistura foi colocada num vasilhame que permitiu sua aspersão na mistura cimento madeira já no interior da betoneira.

A betoneira foi previamente lavada antes de iniciar-se a colocação dos materiais. A ordem de colocação foi definida em função dos resultados obtidos nos ensaios com corpos de prova cilíndricos. O tempo de mistura do material na betoneira foi definido em função do tempo de aspersão da água mais o aditivo na mistura, o que foi feito com a betoneira em movimento.

Após a mistura o material foi retirado da betoneira e pesado na quantidade previamente determinada. Após foi colocado dentro de uma caixa formadora de colchão que por sua vez foi colocada sobre uma chapa de alumínio previamente untada com óleo desmoldante, para facilitar a desmoldagem do material.

Depois da retirada da caixa formadora de colchão foram colocadas duas barras nas laterais do colchão, cuja espessura foi de 15 mm, onde sobre esse colchão foi colocada outra chapa de alumínio nas mesmas condições da primeira. A finalidade dessas barras foi garantir, durante a prensagem a espessura uniforme da chapa.

Esse procedimento foi repetido por três vezes, uma vez que foram prensadas três chapas simultaneamente. Após a colocação desse conjunto na prensa a mesma foi acionada até atingir a carga de 40 kg/cm² e os colchões atingirem a espessura de 15 mm. Mantendo a prensa acionada foi feito o grampeamento desse conjunto que assim permaneceu durante 24 horas. A prensa foi desligada, porém o grampeamento garantiu a pressão necessária do painel até sua cura inicial. Na figura 27 ilustra-se a prensa.



FIGURA 27 – EQUIPAMENTO PARA PRENSAGEM DE PAINÉIS

Completado esse período, os grampos foram retirados e o material foi armazenado na câmara climática durante 13 dias quando então foi encaminhado à marcenaria para a preparação dos corpos de prova para os diversos ensaios. Os painéis moldados para a cura com temperatura de 60°C foram encaminhados à câmara preparada para essa finalidade logo após a retirada dos grampos.

Os corpos de prova obtidos pelo corte, com serra circular, dos painéis foram preparados para serem ensaiados de acordo com os procedimentos das normas européias EN 1058 – CEN (1995) e EN 310-(1993) – CEN (1993), bem como da norma americana ASTM-D-1037 (1982).

Os resultados foram tratados estatisticamente através da comparação múltipla de médias e utilizando gráficos de superfície. Estes gráficos apresentam de forma simultânea a variação dos valores para os aditivos e para a granulometria do pó de madeira indicando a melhor combinação.

A – Confecção dos painéis para tratamento em câmara climatizada

Com o objetivo de analisar o comportamento das propriedades dos painéis, bem como verificar a possível redução do tempo de maturação desses painéis utilizou-se neste experimento a cura a vapor para a combinação de pó de madeira e aditivo que fornece o melhor resultado em termos de módulo de ruptura e módulo de elasticidade na flexão.

Dessa forma, após a prensagem dos painéis, eles permaneceram fixados por meio de grampos por 24 horas antes de irem para a cura à temperatura e umidade constantes.

Após a desmoldagem, os painéis fabricados com essa especificação foram acondicionados em câmara vaporizadora com temperatura de 60°C durante sete dias. Após esse período os corpos foram retirados da câmara climática e colocados em câmara climática durante 24 horas a uma temperatura de $20 \pm 1^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $60\% \pm 5\%$. Na figura 28 pode observar-se a câmara de vaporização utilizada para esse tipo de cura.



FIGURA 28 – DETALHE DA CÂMARA DE CLIMATIZAÇÃO

A elevação da temperatura na câmara de climatização foi gradual, na ordem de 20°C por hora de forma a evitar que o choque térmico gere uma diferença entre a temperatura no interior da chapa e a sua temperatura externa gerando assim tensões térmicas que podem causar, por sua vez, trincas e fissuras que comprometem a resistência desse painel. A distribuição interna do vapor na câmara foi tal que permitiu que todos os pontos no interior da câmara permanecessem na mesma temperatura, para garantir que o corpo de prova, no caso o painel, atinja uma resistência uniforme. Da mesma forma foram tomados cuidados na retirada do material da câmara para que o retorno à temperatura ambiente também fosse gradual para evitar novamente o choque térmico.

B – Confeção de painéis utilizando a mistura de aditivos

Considerando que a forma de atuação do silicato de sódio consiste, conforme BERALDO et al.(1998), na mineralização da madeira e buscando comparar com resultados já obtidos, foi efetuada a moldagem de chapas com a mistura do aditivo silicato de sódio e sulfato de alumínio conforme os seguintes procedimentos:

- A quantidade da material adotada foi a mesma utilizada em moldagens anteriores;
- O teor dos aditivos foi o mesmo, ou seja, 4% em função da massa do cimento;
- O silicato de sódio, misturado com 50% da água, foi aspergido totalmente sobre o pó de madeira, com a betoneira em movimento;
- O sulfato de alumínio, misturado com o restante de água, foi aspergido na mistura cimento madeira, também com a betoneira em movimento;
- O pó de madeira adotado foi o de granulometria com MF =1,50 pelo fato de fornecer os melhores resultados tanto para o sulfato de alumínio quanto para o silicato de sódio;
- Os demais procedimentos foram mantidos.

A proposta de aspergir o silicato de sódio somente na madeira foi a de possibilitar o envolvimento desta pelo silicato e só após foi adicionado o sulfato de alumínio.

3.3 - Análise dos corpos de prova cilíndricos

O estudo da resistência à compressão foi precedido pela caracterização do pó de madeira no que tange aos aspectos da granulometria e de suas características físicas. O ensaio de compressão axial, em corpos de prova cilíndricos, tem como objetivo caracterizar a influência do cimento e da madeira no compósito.

3.3.1 Análise das propriedades físicas

A trabalhabilidade da argamassa do compósito foi determinada adaptando-se a norma da NBR 11580 (1991). Os valores forma medidos em milímetros. O ensaio de trabalhabilidade consiste em colocar toda a mistura, ainda úmida sobre uma chapa metálica e efetuar os golpes necessários de acordo com os seguintes procedimentos:

- a) Molda um tronco de cone, sobre uma mesa metálica, com todo o material do compósito já previamente misturado e homogeneizado;
- b) Após a retirada do molde, aplica-se uma série de golpes (30) produzidos através da queda da mesa de uma altura de 1 centímetro.
- c) Mede-se o diâmetro em sentidos ortogonais e utiliza-se a média como medida de trabalhabilidade, em milímetros.

Na figura 29 observa-se o esquema deste ensaio.

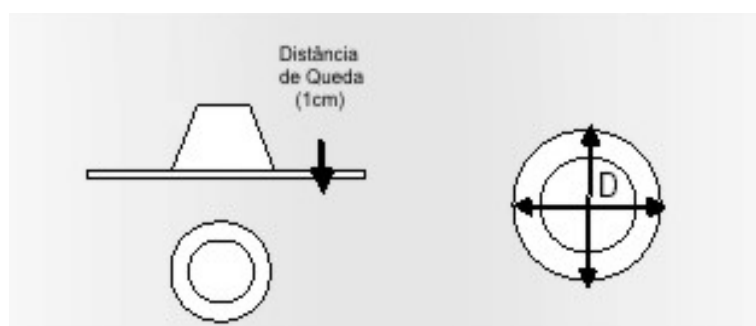


FIGURA 29 – ESQUEMA DO ENSAIO DE TRABALHABILIDADE

A densidade aparente dos corpos de prova foi determinada momentos antes de seu rompimento. O volume foi determinado através de medidas feitas com o paquímetro e a massa foi determinada em balança de precisão. O cálculo da relação entre a massa e o volume forneceu a densidade.

3.3.2 Ensaio de resistência à compressão axial

A determinação da resistência à compressão axial foi feita de acordo com a norma NBR 7215 (1996) e os valores foram obtidos diretamente do equipamento. O cálculo da resistência à compressão é feito dividindo-se a força aplicada pela área transversal do corpo de prova e é dado em MPa.

Por sua vez o módulo de elasticidade é medido pela razão entre a tensão aplicada e a deformação resultante, no trecho em que a deformação é proporcional à tensão e totalmente reversível.

Na seqüência buscou-se determinar o comportamento do compósito frente a variação do fator água/cimento. Desta forma para cada mistura cimento e pó de madeira variou-se a quantidade de água. A quantidade mínima adotada foi aquela que gerou a deformação de pelo menos 1 centímetro no ensaio de trabalhabilidade. O ensaio de trabalhabilidade foi adaptado da NBR 11580 (1991).

3.3.3 Estudo da relação madeira cimento

A análise do comportamento do compósito em função da alteração do fator água cimento e da variação do teor de madeira no compósito é efetuada de acordo com o delineamento apresentado na figura 30.

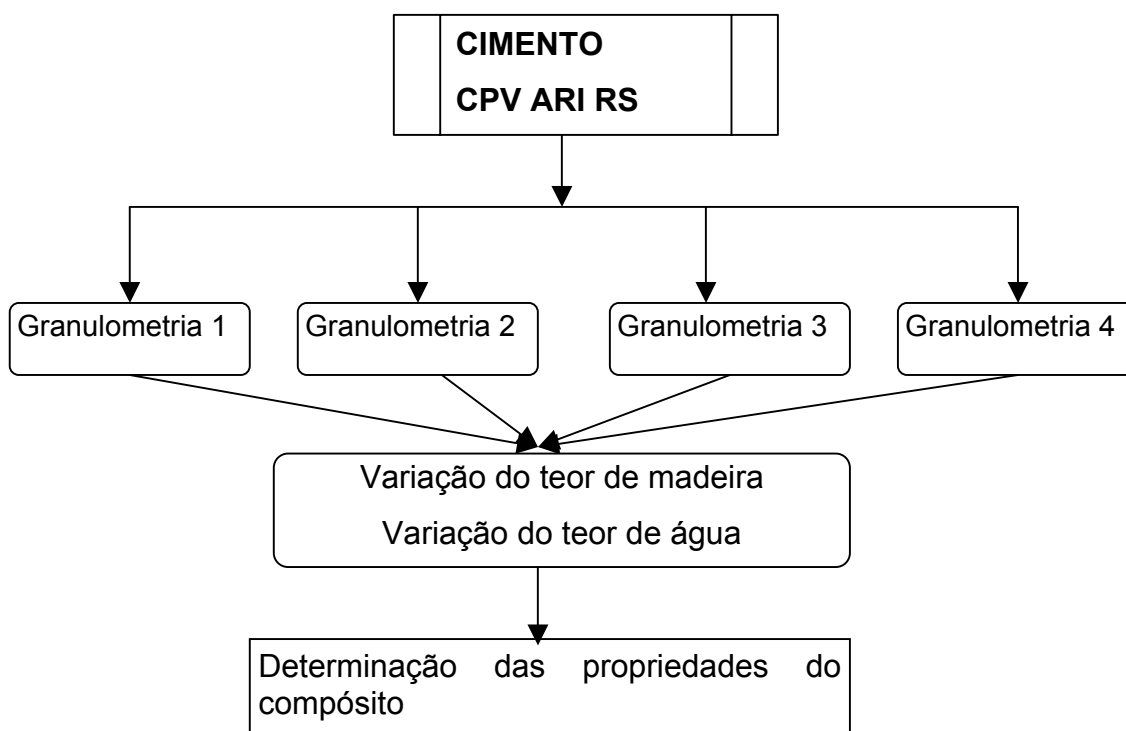


FIGURA 30 – DELINEAMENTO: ESTUDO DAS GRANULOMETRIAS E FATOR A/C

Na primeira parte desse estudo foram moldados 4 corpos de prova para cada granulometria do pó de madeira e para cada teor adotado. Os teores adotados são: 7,5%, 10%, 15%, 20% e 25%. O fator água/cimento foi mantido o mesmo para cada teor de madeira, ou seja 0,50. O limite de 25% foi observado porque acima desse valor as moldagens são viáveis apenas com a utilização de equipamento de pressão.

Na segunda parte foram moldados, para cada granulometria especificada através do módulo de finura, quatro corpos de prova cilíndricos para 4 relações do fator água cimento. Nessa situação o teor de madeira foi mantido constante, ou seja de 7,5% em relação à massa do cimento.

3.4 Análise dos Painéis

O estudo dos painéis teve início com a determinação do traço da mistura, ou seja, a dosagem de seus componentes sendo que para isso foram realizadas misturas experimentais baseadas em análises feitas por diversos autores. Assim buscou-se inicialmente a moldagem de painéis utilizando somente a madeira, o cimento e a água. Nesta situação, a dosagem inicial adotada foi de 30% de pó de madeira em relação à massa de cimento, para todas as granulometrias. O fator água cimento foi constante e igual a 0,43.

Considerando que os resultados, para o teor de 30% sem aditivos, foram nulos, para todas as propriedades analisadas, adotou-se então o teor de 25% de teor de madeira.

3.4.1 Delineamento experimental

Nos ensaios de compressão axial buscou-se identificar qual o comportamento desse compósito frente à distintas granulometrias e também em função da relação cimento/madeira. Buscou-se também a análise do comportamento em função da variação do fator água-cimento.

O esquema geral para o estudo do comportamento das propriedades dos painéis em função das granulometrias adotadas e dos aditivos pode ser visto na figura 31.

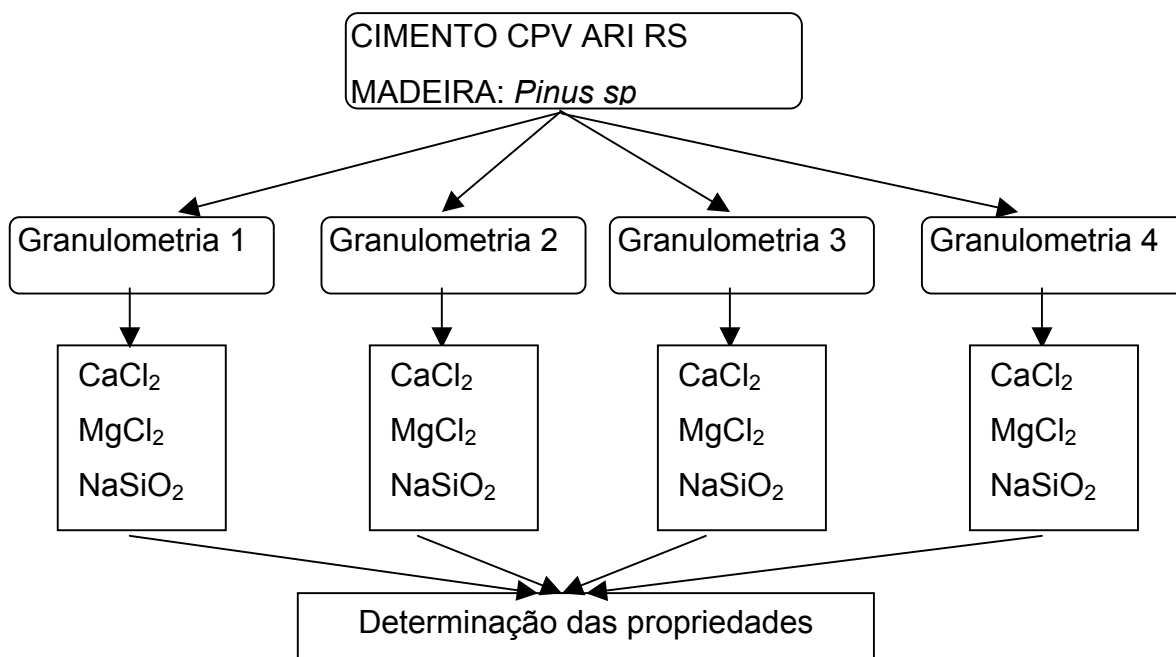


FIGURA 31 – DELINEAMENTO PARA O ESTUDO DE GRANULOMETRIAS E ADITIVOS

Foi realizado paralelamente experimento onde utilizou-se a mistura dos aditivos à base de sulfato de alumínio e silicato de sódio, buscando-se assim a melhoria das propriedades. Neste experimento tratou-se a madeira com o silicato de sódio, procurando “mineralizar” a madeira para depois adicionar o sulfato de alumínio na mistura.

Finalmente foi adotado o teor pó de madeira de 36%, equivalente a relação madeira cimento de 1:2,75, para buscando reduzir a densidade do painel e seu custo uma vez que o cimento é mais caro que o pó de madeira.

A densidade alvo adotada para os painéis é de 2,0 g/cm³. Essa densidade é adotada em função das características granulométricas da madeira. Por ser pó de madeira, buscou-se uma maior compactação, o que implica numa maior densidade visando obter uma maior homogeneidade do material o que leva como consequência a uma desejada melhoria das propriedades como o módulo de ruptura, módulo de elasticidade e absorção, por exemplo.

3.4.2 Propriedades dos painéis

A moldagem das chapas foi feita com 385 mm x 505 mm. Para o corte na serra circular a chapa é reduzida ao tamanho de 300 mm x 400 mm, sendo daí retirado os corpos de prova para os ensaios de:

1. Flexão estática: 4 corpos de prova com dimensões de 50 mm x 250mm, EN 1058 – CEN (1995);
2. Compressão paralela: 4 corpos de prova com dimensões de 25 mm X 100 mm, ASTM 1037 (1982);
3. Ligação interna: 6 corpos de prova com dimensões de 50 mm X 50 mm, ASTM 1037-78B (1982);
4. Absorção de água e inchamento em espessura: 2 corpos de prova com dimensões de 150 mm X 150 mm, ASTM 1037-34-22 e 1037-100 (1982)

A distribuição e forma de corte dos painéis foi realizada conforme apresentado na figura 32. O corte foi feito com serra circular própria para materiais cimentícios.

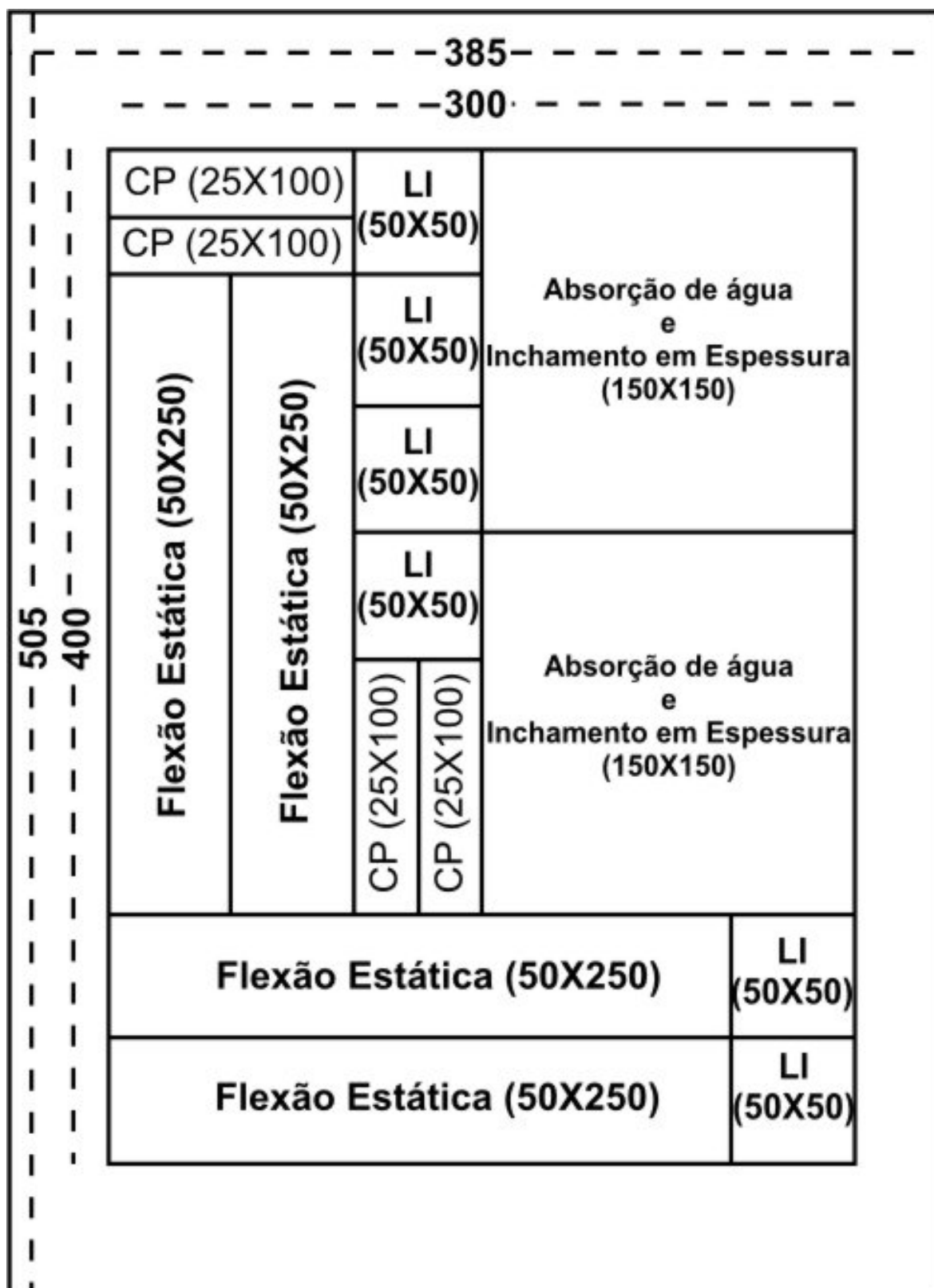


FIGURA 32 – DISTRIBUIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA, PARA O CORTE

FONTE: ASTM 1037 – 1982

A avaliação das propriedades dos painéis para flexão estática, módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) foram realizadas de acordo com a norma europeia EN 310 (1993). Essa norma especifica como devem ser realizados os ensaios para a determinação do módulo de elasticidade e do módulo de ruptura à flexão.

Os ensaios de inchamento em espessura e absorção de água foram feitos de acordo com a norma ASTM 1980 D1037-34-22 e D1037-100, onde neste caso os corpos são imersos em água e as medidas e o peso são determinados.

O cálculo do coeficiente de absorção de água foi realizado através da fórmula:

$$(W_1 - W_2) / W_2 * 100 \quad [3]$$

com os resultados obtidos percentualmente. O coeficiente de expansão linear foi calculado conforme SHIGEKURA et al. (1994) ou seja, pela fórmula

$$(l_2 - l_1) / l_1 * 100, \quad [4]$$

sendo o resultado também em percentual.

A determinação da resistência à compressão e à ligação interna foram determinadas de acordo com a norma ASTM 1980 (1982).

3.4.3 *Análise estatística*

A análise estatística buscou-se comparar as médias dos resultados que avaliam a resistência em função da variação dos aditivos, do fator água cimento e do teor de pó de madeira, para a média dos grupos. Para isso utilizou-se a análise da variância ou resumidamente a ANOVA na qual subdividiu-se a variação total entre os grupos da variação dentro dos grupos ou variação interna aos grupos. À variação interna ao grupo é atribuída ao erro experimental, ou seja, às pequenas variações encontradas entre um procedimento de ensaio e outro. À variação entre os grupos atribuiu-se ao efeito do tratamento dado, ou seja, no presente trabalho, à variação da granulometria dos aditivos.

A - Comparações múltiplas

No teste de comparações múltiplas procurou-se determinar se existe diferença entre as diversas médias dos dados resultantes dos ensaios. Desta forma foram acrescentados às tabelas as letras a, b, c e d para identificar a homogeneidade ou a diferença significativa entre as médias. Ou seja, as médias nas quais não se identificou diferenças estatisticamente significativas possuem o mesmo tipo de letra.

Letras diferentes logo após o resultado da média identificam diferenças estatisticamente significativas. Observa-se na tabela 15 um exemplo da identificação das diferenças entre as médias..

TABELA 15 – EXEMPLO DA COMPARAÇÃO MÚLTIPLA DE MÉDIAS

Tipo de aditivo	Ensaio	Média MPa	Grupos homogêneos
Cálcio	4	32415	a
Magnésio	4	32496	a
Sulfato	4	35981	a
Silicato	4	46991	b

No exemplo observado na tabela 15 a letra “a” indica que não houve diferença significativa entre os aditivos a base de cálcio, magnésio e sulfato e a letra b indica que o aditivo a base de silicato diferenciou-se significativamente de todos os demais.

B - Análise gráfica

Uma das dificuldades na análise estatística é a observação da influência de mais de uma variável sobre uma outra variável de interesse, conforme NETO et al.(1995). Para o presente trabalho a influência simultânea da variação do aditivo e da variação granulometria sobre as propriedades do módulo de ruptura, ligação interna entre outras pode ser visualizado utilizando-se de gráficos de superfícies que relacionam três variáveis simultaneamente. Essa mesma técnica também é apresentada por MYERS e MONTGOMERY (2002), onde citam que, em situações onde várias variáveis influenciam potencialmente características quantitativas ou qualitativas, a técnica da superfície de resposta identifica suas influências.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estudo da granulometria

4.1.1 Módulo de finura

O módulo de finura é determinado de acordo com a NBR 5734 (1991) e consiste na soma das percentagens retidas, acumuladas, na série de peneiras especificadas pela norma, dividida por 100. Os valores médios encontrados estão apresentados na tabela 16.

TABELA 16 – MÓDULO DE FINURA

IDENTIFICAÇÃO	CÓDIGO DA EMPRESA	MÓDULO DE FINURA
PÓ 1	93003	0,28
PÓ 2	2044/80	0,75
PÓ 3	2044/55	1,50
PÓ 4	2042	1,57

A empresa Inbrasfama S/A, fornecedora do pó de madeira, adota código específico para cada granulometria, identificando ainda o pó de madeira como farinha. Visando facilitar a compreensão adotou-se a identificação de 1 a 4 da menor para a maior granulometria, conforme tabela 16.

Observa-se pelo resultado que o pó de madeira identificado com o número 1 e 2 são os mais finos, pois apresentaram o menor módulo de finura. Ainda, a título de comparação, BERALDO (1998), trabalhou com o módulo de finura de 4,30, mostrando as partículas utilizadas neste trabalho são menores.

No entanto, cabe observar que, de acordo com a NBR 7217 (1982) que o material seja peneirado até que menos de 1% do material passe por qualquer uma das peneiras, o tempo de peneiramento para as partículas de madeira pode ser relativamente longo. O tempo medido neste trabalho, de forma a atender as exigências da norma, foi de 10 minutos. Contudo, esse tempo excessivo altera a granulometria, pois no caso de partículas muito finas como o do pó número 1, a quantidade passante é significativa e, por sua vez, a soma das percentagens

acumuladas que define o módulo de finura fica baixa, justificando assim o valor de 0,28 obtido para este pó de madeira.

4.1.2 Curva granulométrica

As granulometrias do pó de madeira foram determinadas adaptando-se a NBR 7217 (1982) que trata da composição granulométrica de agregados. Apesar de ser aplicada para agregados do concreto e da argamassa, este método é freqüentemente adaptado e utilizado para a determinação da granulometria de agregados orgânicos, no caso o pó de madeira, como realizado por GRANDI (1995).

A análise granulométrica do pó de madeira pode ser observada na figura 33.

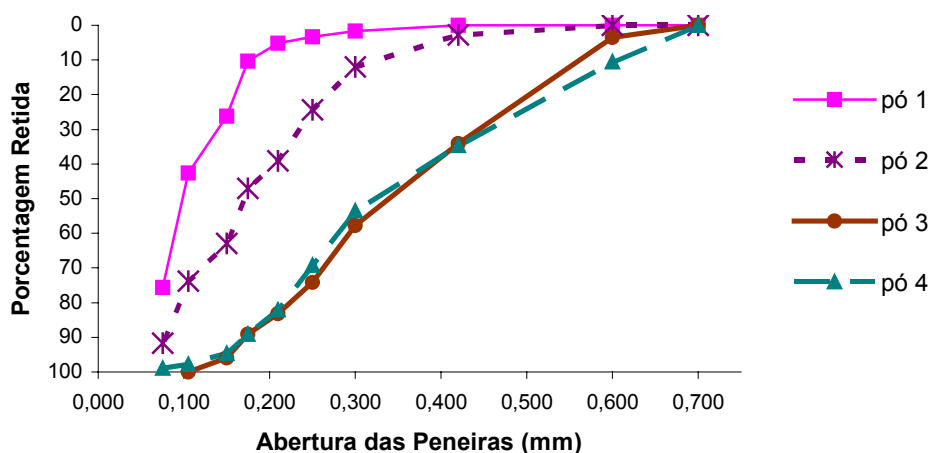


FIGURA 33 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO PÓ DE MADEIRA

A figura 33 indica que os pós de madeira de número 1 e 2 são os mais finos já que têm a maior parte do material passante pela malha 0,3 mm. Já o pó de madeira número 3 e 4 são menos finos. Usa-se o termo “menos fino” para diferenciar os diversos tipos de pó de madeira.

Como exemplo desse fato, pode-se mesclar os gráficos que mostram as granulometrias desses pós de madeira com as granulometrias adotadas por SOROUSHIAN, (1994) que utilizou fibras de papel reciclado. A figura 34 apresenta essa comparação.

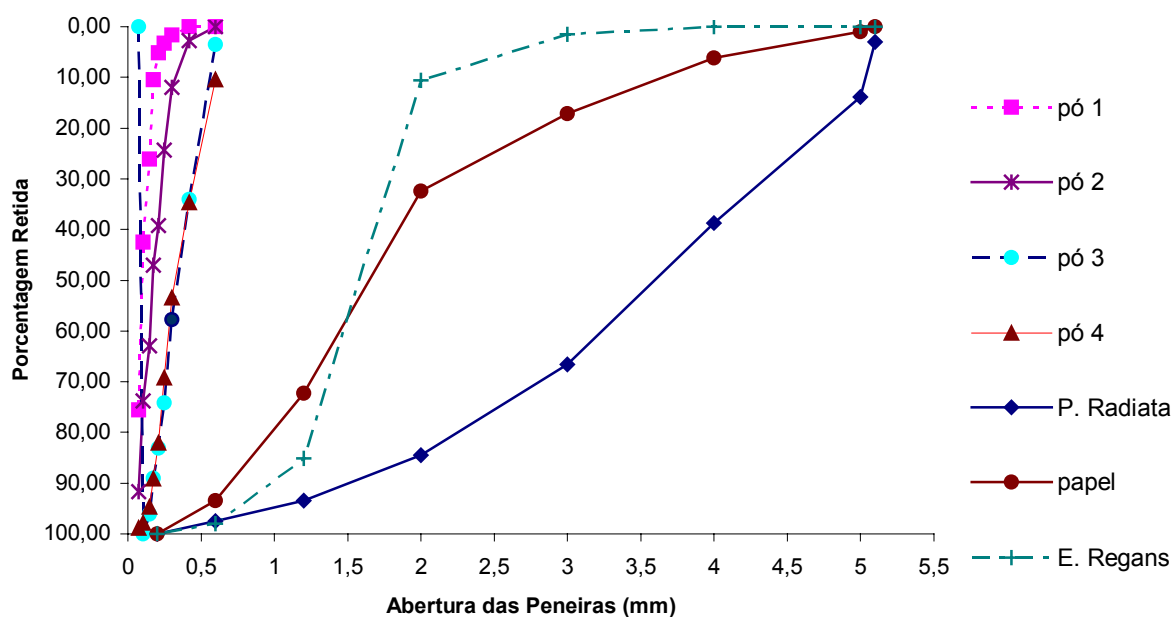


Figura 34 Comparação entre granulometrias

Observando a figura 34, pode-se ter uma noção do tamanho das partículas comparadas às fibras cuja origem é o papel reciclado. Deve se considerar que as fibras do papel têm o comprimento muito maior que as outras duas dimensões e que o pó de madeira tem uma diferença muito pequena entre as três dimensões.

4.2 Análise dos procedimentos

Após a caracterização da granulometria do pó de madeira foram realizados ensaios cujo objetivo foi verificar se a ordem de colocação dos materiais altera o resultado. Para esse ensaio foram adotados dois tipos de granulometria, o pó mais fino, conforme granulometria já apresentada, ou seja, de módulo de finura igual a 0,28 e a pó mais grosso ou o de módulo de finura igual a 1,57.

Os corpos de provas oriundos das misturas feitas através dos procedimentos 1 e 2 foram ensaiados à compressão axial, de acordo com a NBR 5739 (1994). Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 17, discriminados pelo módulo de finura do pó de madeira.

TABELA 17 - TENSÃO MÉDIA EM FUNÇÃO DO PROCEDIMENTO

GRANULOMETRIA MÓDULO DE FINURA	TEOR DE UMIDADE	PROCEDIMENTO	TENSÃO (MPa) MÉDIA	TESTE t
0,28	3,00%	Procedimento 1	27.38	a
0,28	3,10 %	Procedimento 2	22.15	b
1,57	2,90%	Procedimento 1	21.49	b
1,57	3,00%	Procedimento 2	28.32	a

Observa-se através da tabela 17 que os maiores valores para o procedimento 1 foram obtidas para o pó de madeira mais fino, indicando uma possível influência da granulometria, ou seja, o pó mais grosso, dentro desses padrões, determina um maior valor para a resistência à compressão.

A análise estatística, conforme anexo III, indica que há diferença significativa entre as médias dos valores obtidos, com nível de significância de 5%. Em outras palavras há influencia na forma como são misturados os ingredientes. Essa influência pode ser devido ao fato de que a madeira absorve boa quantidade da água de amassamento e essa água por sua vez pode ficar retida nos poros dessa argamassa, colaborando com o aumento de vazios e assim reduzindo a resistência do corpo de prova.

No entanto, para o pó de madeira mais grosso com módulo de finura 1,57, apesar de também existir diferença estatisticamente significativa entre as médias, o valor mais alto foi o do procedimento dois, o inverso do ocorrido com o pó mais fino. O fato é que para o pó de madeira mais fino é necessário aumentar a quantidade de cimento para colar o agregado devido a maior superfície específica.

4.3 O fator água-cimento

Esse trabalho se diferencia dos demais citados anteriormente pelo fato de se utilizar o pó de madeira. A hipótese é de que partículas menores de madeira levem a uma melhor homogeneização do compósito e que esse fato leve a uma maior resistência final desse material.

Ao se utilizar o pó, o comprimento das fibras de celulose fica severamente reduzido o que pode implicar numa menor resistência à tração desse compósito. No entanto, a distribuição homogênea do pó de madeira deve compensar amplamente a perda da resistência à tração ocorrida devido à redução do comprimento das fibras, fato esse comprovado pelos elevados valores obtidos nos ensaios.

4.3.1 A resistência em função do fator água cimento

Após a caracterização granulométrica do pó de madeira, buscou-se analisar o comportamento desse compósito frente às variações do fator a/c (água/cimento), comparando com o mesmo comportamento para argamassas utilizando o procedimento 2 ou seja, colocando o pó de madeira, 90% da água, cimento e finalmente os 10% restantes de água.

Os procedimentos para o rompimento dos corpos de prova foram de acordo com NBR 5738 (1993).

Pela figura 35 observa-se o resultado graficamente.

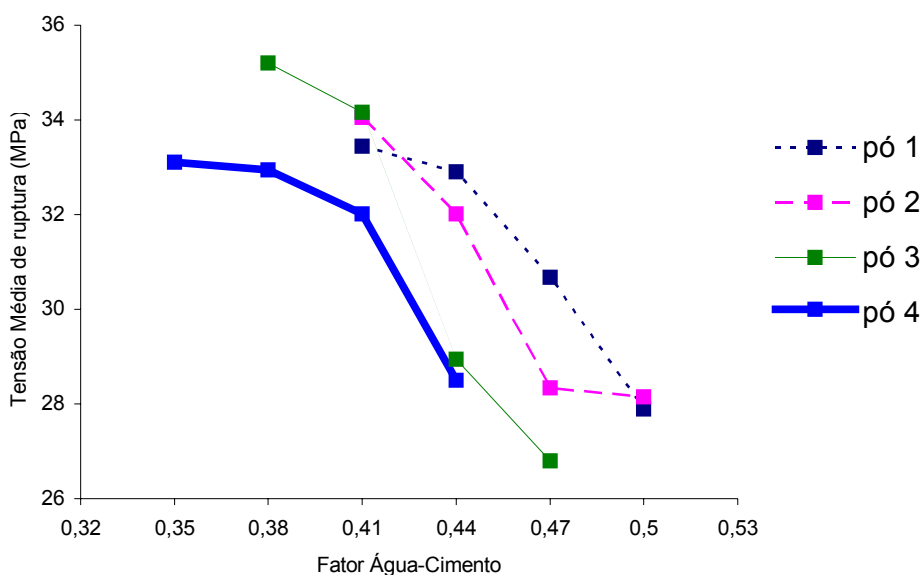


FIGURA 35 – RELAÇÃO ENTRE O FATOR ÁGUA CIMENTO E A RESISTÊNCIA

Apesar da diferença entre os valores observados verifica-se, conforme anexo IV, que não há diferença estatística significativa entre os valores.

Verifica-se na figura 35 que o comportamento do compósito, frente à variação do fator água/cimento, é semelhante ao observado para argamassas de cimento. É natural esperar-se que haja um decréscimo da resistência em função do aumento do fator água cimento, pois está de acordo com a lei de Abrams, aplicável aos cimentos.

A adoção de diferentes fatores a/c foi em função da trabalhabilidade, pois buscou-se moldar os corpos de prova de acordo com o menor fator a/c possível. Esse fato está associado ao tamanho das partículas. Quanto menor for a partícula maior

será a energia desprendida para que ocorra a adsorção. O pó de madeira mais fino, desta forma, vai absorver a água muito mais rapidamente do que o pó de madeira mais grosso.

A diferença granulométrica é relativamente pequena para apresentar valores significativamente distintos, considerando que o teor de pó adotado é de 7,5% que equivale ao traço cimento madeira 13:1 (13 partes de cimento para uma parte de madeira).

Cabe ressaltar como importante resultado o valor elevado das resistências encontradas, conforme se observa na tabela 18.

TABELA 18 – RELAÇÃO ENTRE O FATOR ÁGUA-CIMENTO E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

TIPO DE PÓ	FATOR A/C	RESISTÊNCIA (Kgf/cm ²)	CV (%)
1	0,41	33,45 ^a	1,2
	0,44	32,91 ^a	1,8
	0,47	30,67 ^a	1,5
	0,5	27,89 ^a	1,3
2	0,41	34,05 ^a	0,7
	0,44	32,02 ^a	3,8
	0,47	28,34 ^a	1,1
	0,50	28,15 ^a	1,2
3	0,38	35,20 ^a	1,7
	0,41	34,16 ^a	1,8
	0,44	28,94 ^a	3,8
	0,47	26,80 ^a	2,6
4	0,35	33,11 ^a	2,3
	0,38	32,94 ^a	2,5
	0,41	32,02 ^a	2,3
	0,44	28,50 ^a	1,7

A tabela 18 indica a influência da granulometria no consumo de água. Observa-se que o pó número 4, 0 mais grosso, permitiu a moldagem e o adensamento para o menor fator a/c entre todas as granulometrias. Esse fato pode ser explicado em função da superfície específica dos grãos de madeira, onde o pó de número 1, por ser o mais fino, tem maior superfície e como consequência tem maior área para ser molhada o que leva a um maior consumo de água.

Por sua vez o pó de número 3, com módulo de finura igual a 1,50, portanto próximo ao módulo de finura do pó 4, teve semelhante quantidade de água na sua moldagem. Fato semelhante ocorreu entre o pó 1 (mais fino) e o pó 2, pelo mesmo motivo.

Pode-se observar ainda que o menor fator água cimento foi para o pó mais grosso, ou seja, a de número 4, seguido de perto pelo pó de número 3. Através do ensaio de granulometria verificou-se que esses dois pós são os mais grossos quando comparados com as de número 1 e 2.

4.3.2 A variação da densidade

Os valores médios da densidade são apresentados na tabela 19, considerando apenas o tipo do pó ou seja, para todos os fatores água/cimento.

TABELA 19 – VALORES MÉDIOS DA DENSIDADE DOS CORPOS DE PROVA

PÓ NÚMERO	MÓDULO DE FINURA	DENSIDADE	
		g/cm ³	CV %
1	0,28	1,76 a	1,45
2	0,75	1,79 a	2,20
3	1,50	1,77 a	2,48
4	1,57	1,75 a	2,20

Na figura 36 observa-se graficamente os resultados.

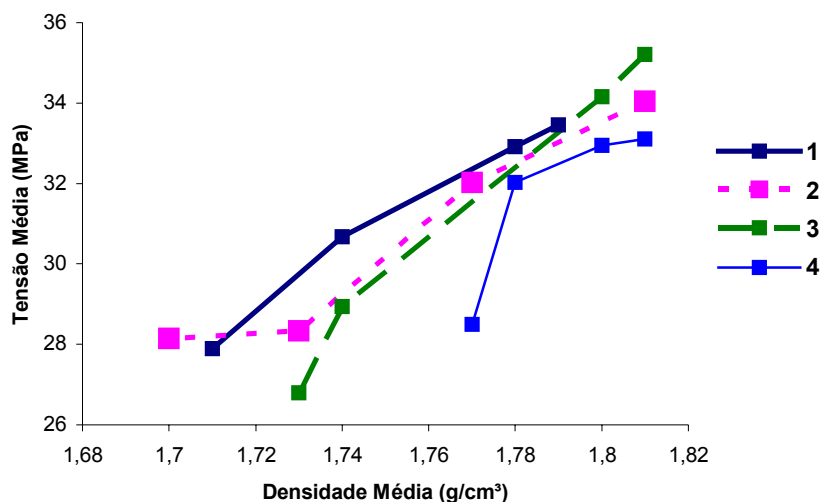


FIGURA 36 – RELAÇÃO ENTRE DENSIDADE E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Através da figura 36, observa-se a relação densidade com a resistência à compressão. Verifica-se visualmente no gráfico que o pó mais fino ofereceu as maiores resistências.

Relacionando a densidade com o fator a/c, obtém-se graficamente os seguintes resultados conforme mostrado na figura 37.

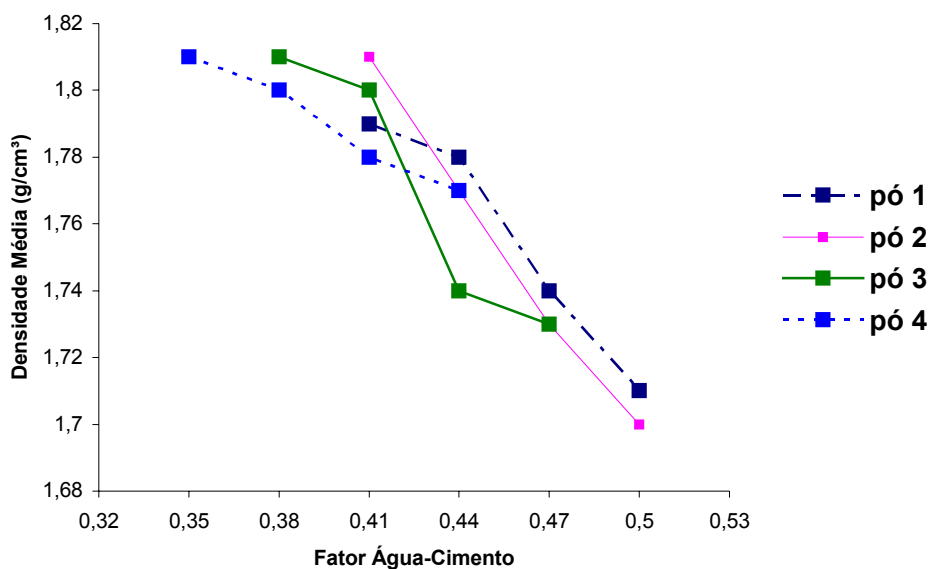


FIGURA 37 – RELAÇÃO ENTRE DENSIDADE E FATOR ÁGUA-CIMENTO.

De acordo com a figura 37 observa-se que o pó 1 (mais fino) e o 4 (mais grosso) forneceram densidades mais elevadas, o que leva a um melhor comportamento com relação às tensões. No entanto deve-se ressaltar que o fator água/cimento do pó 4 (mais grosso) é menor, devido a menor quantidade de água exigida para sua moldagem, o que leva como consequência a uma maior densidade.

Resultados menores foram observados em outros trabalhos sendo, contudo para granulometrias mais grossas da madeira. Deve-se considerar, também, as diferenças de densidade entre as espécies. Os valores obtidos, mais uma vez, levam a inferir que a granulometria mais fina influi favoravelmente na resistência à compressão final do compósito.

4.3.3 A variação da trabalhabilidade

A trabalhabilidade foi determinada pelo ensaio de “*flow table*” obedecendo aos procedimentos já citados, cujos resultados são apresentados na tabela 20. Os valores apresentados nesta tabela são as médias para os diversos fatores a/c.

TABELA 20– VALORES MÉDIOS DA TRABALHABILIDADE

PÓ DE MADEIRA	MÓDULO FINURA	TRABALHABILIDADE	CV
		(mm)	%
1	0,28	263,9 a	1,45
2	0,75	281,2 a	2,20
3	1,50	277,3 a	2,48
4	1,57	262,2 a0	2,20

Os resultados desse ensaio, conforme figura 38 e 39 mostram a relação entre a trabalhabilidade e o fator água cimento, bem como a relação entre a trabalhabilidade e a resistência.

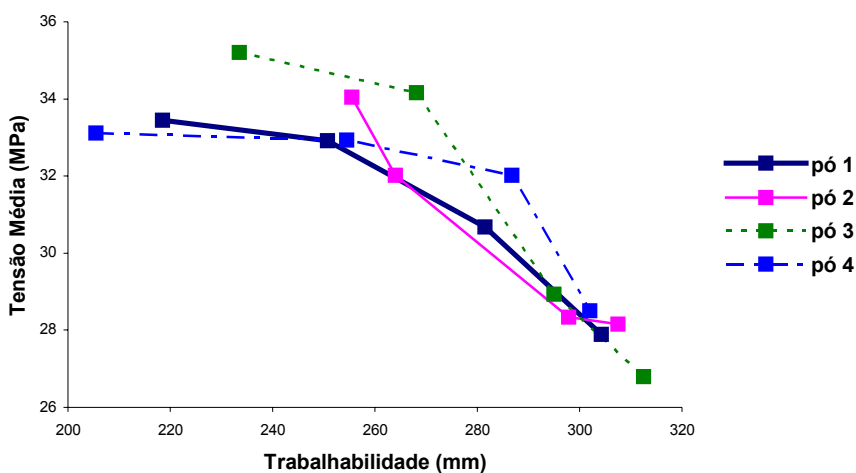


FIGURA 38 – RELAÇÃO ENTRE TRABALHABILIDADE E TENSÃO-

Analisando a figura 38, observa-se que há um decréscimo da tensão, ou seja, da resistência à compressão, com o aumento da trabalhabilidade. O que é de se esperar uma vez que esse aumento foi obtido pela adição de mais água e, conforme

verificou-se na relação fator água cimento X tensão, aqui também ocorre o mesmo efeito.

O coeficiente de correlação médio para as quatro granulometrias é de 89%, valor bastante significativo. O valor mais baixo para a correlação foi para o pó de número 4 ou seja, o mais grosso de todos.

Na figura 43, comprova-se o que a trabalhabilidade aumenta com o aumento do fator água cimento. O que chama a atenção neste gráfico é a acentuada inclinação, mostrando que a quantidade de água adicionada tem forte influência nesta propriedade.

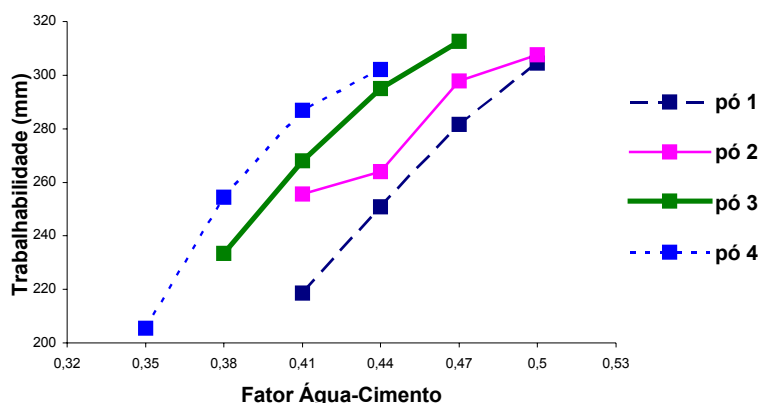


FIGURA 39 – RELAÇÃO ENTRE TRABALHABILIDADE E FATOR ÁGUA-CIMENTO

4.3.4 A variação do teor de madeira

O comportamento da resistência à compressão para compósitos a base de cimento madeira foi estudado por diversos autores conforme visto na revisão da literatura. Foi demonstrado nesses artigos que há uma diminuição significativa da resistência em função do aumento de teor de pó. Para a comprovação desses resultados, foram moldados 4 corpos de prova para cada tipo de pó de madeira com os seguintes teores: 7,5%; 10%; 15%; 20% e 25% de pó de madeira.

Nesta situação, foi sempre respeitado o aspecto de que na moldagem o material deve permitir seu adensamento sem a necessidade de exercer qualquer tipo de pressão. Nesse experimento não foi adicionado nenhum tipo de aditivo. A tabela 21 apresenta os resultados destes ensaios:

TABELA 21 – RELAÇÃO DO TEOR DE MADEIRA E A TENSÃO À COMPRESSÃO

número	TENSÃO EM FUNÇÃO DO TEOR DE PÓ DE MADEIRA (MPa)					CV (%)
	7,5%	10%	15%	20%	25%	
1	33,45 a	27,07 a	15,93 a	9,37 a	3,23 a	69,77
2	34,05 a	27,28 a	18,23 a	11,55 a	1,52 a	69,10
3	35,20 a	27,89 a	19,95 a	13,16 a	1,06 a	67,88
4	33,11 a	25,70 a	22,58 a	16,32 a	9,36 a	42,27

A partir dos resultados numéricos observa-se que até o teor de 20% de pó de madeira as tensões são relativamente elevadas reduzindo de forma mais acentuada para o teor de 25% de pó de madeira.

A análise estatística, conforme anexo VII indica que não há diferença significativa entre as diversas granulometrias, considerando todos os valores, independente do teor de madeira adotado. Em outras palavras, o comportamento da variação do teor de madeira é estatisticamente igual.

O coeficiente de variação foi menor para o pó de madeira mais grosso mostrando que a variação da tensão foi menor quando comparada a outras granulometrias.

A relação entre o teor de pó de madeira e a resistência à compressão pode ser observada graficamente através da figura 40.

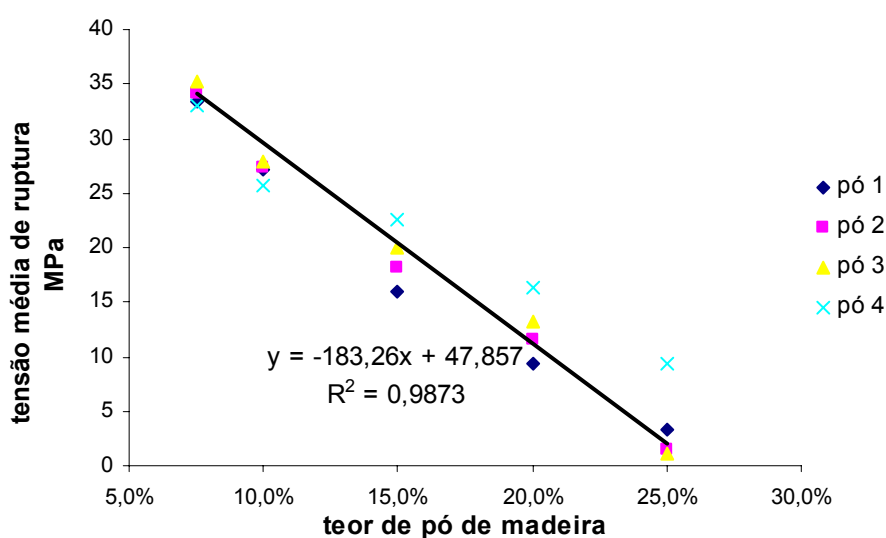


FIGURA 40 – RELAÇÃO ENTRE TEOR DE MADEIRA E A TENSÃO À COMPRESSÃO

A figura 40 apresenta a relação da tensão média de ruptura com o teor de pó de madeira. Observa-se inicialmente que para teores de 7,5% os resultados são muito elevados, na ordem de 35 MPa. Até o teor de 20% os valores continuam relativamente altos, sobretudo quando se considera o fato de que nenhum aditivo foi utilizado e que o uso dos mesmos eleva significativamente os valores obtidos. Apenas para os teores de 25% os resultados foram baixos, pois a quantidade de água utilizada para garantir a mínima trabalhabilidade mínima, foi relativamente elevada.

Outro aspecto a ser observado nesta figura é o elevado coeficiente de determinação entre a resistência à compressão e o teor de pó, ou seja, $r^2 = 93,68\%$. Esta forte correlação pode ser explicada pelo fato de que o aumento do teor de pó de madeira além de reduzir a resistência à compressão, levou a um aumento da quantidade de água, que também levou a redução da resistência.

Os resultados da relação entre o teor de pó de madeira e a densidade obtida com os corpos saturados pode ser observado na tabela 22.

TABELA 22 – RELAÇÃO TEOR DE MADEIRA & DENSIDADE APARENTE

Código	PÓ DE MADEIRA		TEOR DE PÓ DE MADEIRA			
	MF	7,5%	10%	15%	20%	25%
1	0,28	1,79	1,79	1,59	1,56	1,48
2	0,75	1,81	1,79	1,62	1,58	1,52
3	1,50	1,81	1,79	1,69	1,60	1,51
4	1,57	1,81	1,72	1,69	1,63	1,45

Pode-se verificar através da tabela 22 que há uma diminuição significativa da densidade aparente com o aumento do teor de pó. Essa variação foi consequência da diminuição da quantidade de cimento material com densidade de $3,15 \text{ g/cm}^3$ e um aumento na quantidade de vazios devido a alteração do fator a/c. A correlação entre esses dois fatores pode ser observada na figura 41.

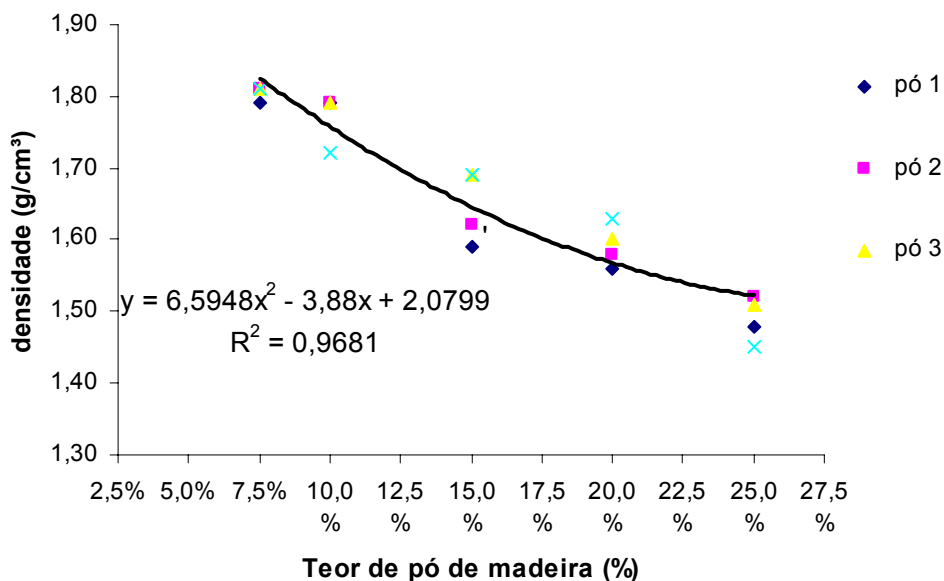


FIGURA 41 – RELAÇÃO ENTRE TEOR DE PÓ E A DENSIDADE

Observa-se na figura 41 que com o aumento do teor de pó de madeira há uma redução da densidade, o que é natural uma vez que a madeira tem densidade menor que a do cimento. Observa-se nesta figura que o melhor ajuste é uma curva polinomial onde o coeficiente de determinação obtido foi de 96,81 %. O coeficiente de determinação é bastante elevado e isso se justifica porque tanto o aumento do teor de pó de madeira quanto o aumento da quantidade de água levam a uma menor densidade.

Comprovando esse fato, o gráfico apresentado na figura 42 mostra a relação entre a tensão e a densidade. A resistência à compressão cresce com o aumento da densidade, ou seja, menores teores de madeira, necessitam de menos água, o que leva a um aumento da densidade elevando a resistência final.

O coeficiente de determinação, com o valor de 92,15%, também é relativamente elevado e novamente justificado pela variação de ambos os fatores.

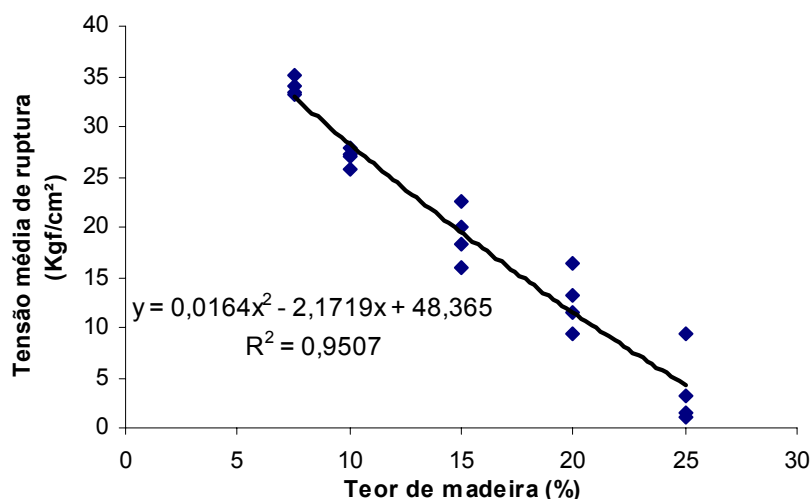


FIGURA 42 – RELAÇÃO ENTRE A DENSIDADE E A TENSÃO À COMPRESSÃO

Observou-se pela análise estatística que não houve diferença significativa entre os diversos tipos de pó de madeira tanto para as tensões encontradas, quanto para as densidades. Em outras palavras o que determinou o comportamento do compósito, em corpos de prova cilíndricos, foi a quantidade de pó de madeira. O anexo VIII apresenta a tabela da análise da variância para a regressão.

Na figura 43 apresenta-se a análise dos resíduos onde pode-se observar a tendência curvilínea dos pontos mostrando que o melhor ajuste é uma curva.

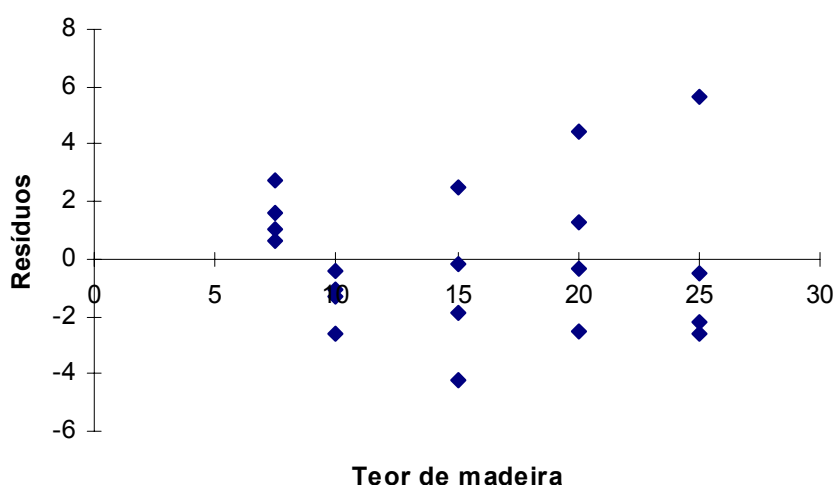


FIGURA 43– GRÁFICO DOS RESÍDUOS TENSÃO X DENSIDADE

4.4 Propriedades dos painéis

4.4.1 Análise da densidade dos painéis

Para cada tratamento realizado foram moldados três painéis, onde, após a confecção dos mesmos as densidades foram determinadas.

A tabela 23 apresenta os valores médios das densidades encontradas para a combinação de cada granulometria com os aditivos.

TABELA 23 – VALORES DA DENSIDADE EM FUNÇÃO DA GRANULOMETRIA

PÓ DE MADEIRA	DENSIDADE (g/cm ³)							
	CaCl ₂	CV (%)	MgCl ₂	CV (%)	Na ₂ SiO ₄	CV (%)	Al ₂ SO ₄	CV (%)
1	1,52 a	5,09	1,47 a	5,26	1,45 a	4,63	1,49 ab	2,95
2	1,53 a	2,59	1,49 a	4,31	1,52 a	5,65	1,53 a	4,05
3	1,51 a	1,22	1,50 a	3,52	1,40 a	6,09	1,41 ab	5,22
4	1,47 a	2,41	1,45 a	2,49	1,46 a	6,32	1,41 b	4,21

Analisando os dados verifica-se que o coeficiente de variação do pó número 1 é maior quando comparado aos coeficientes das demais granulometrias, somente para os aditivos a base de cloro e silicato. Esse fato pode ser explicado pela característica do pó número 1 e pela forma de atuação dos cloretos junto ao cimento. Por ser o pó mais fino adsorve mais rapidamente a água afetando o resultado final.

A análise estatística mostrou que somente o sulfato apresentou diferença significativa onde o pó de granulometria intermediária diferenciou-se da granulometria mais grossa, mostrando que nessa situação seu grau de compactação foi maior.

O comportamento da densidade em função da variação dos aditivos pode ser visualizado graficamente na da figura 44

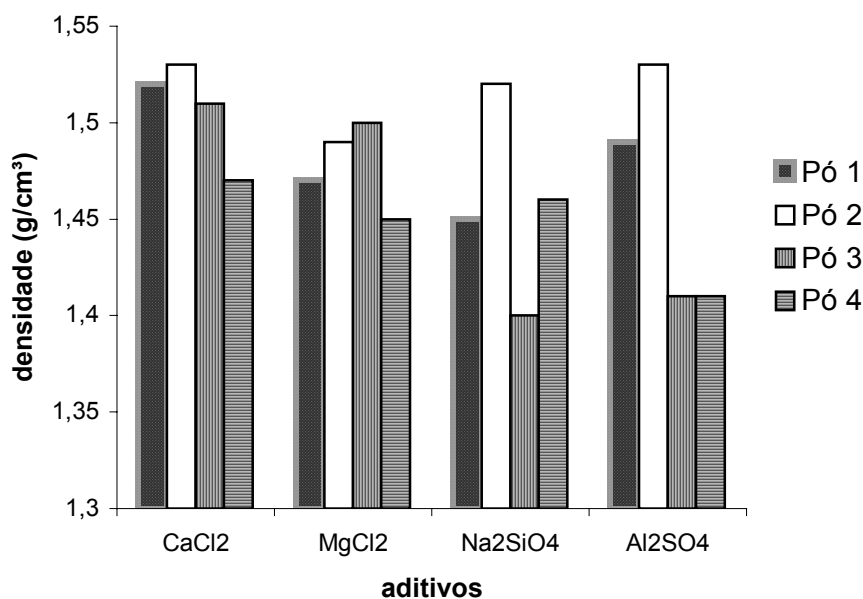


FIGURA 44 – DENSIDADE EM FUNÇÃO DO ADITIVO UTILIZADO

A análise estatística demonstrou que não houve diferença significativa entre as médias das densidades, quando se compara os diversos tipos de granulometria do pó de madeira. Em outras palavras a variação interna ao grupo é relativamente elevada quando comparada com a variância entre os grupos.

Por sua vez o comportamento da densidade em função da variação da granulometria, ou o tipo de pó pode ser observado pela figura 45 a seguir.

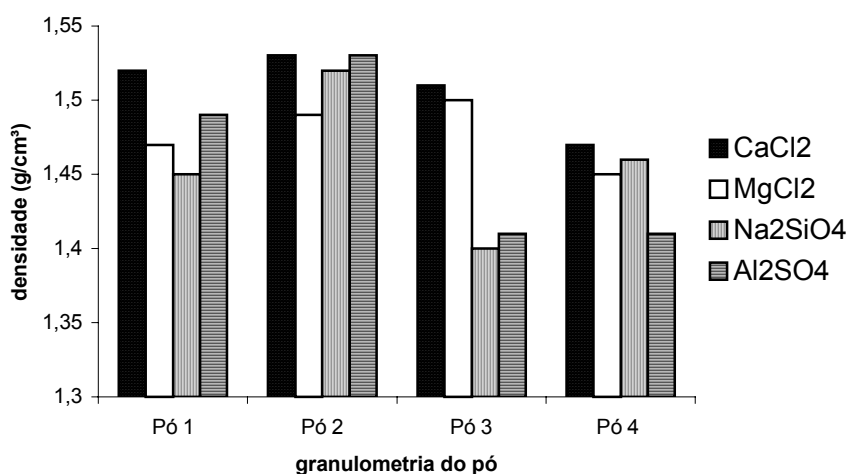


FIGURA 45 – VARIAÇÃO DA DENSIDADE EM FUNÇÃO DA GRANULOMETRIA

A figura 45 mostra pequena diferença visual entre as densidades para as diversas granulometrias. No entanto, estatisticamente verifica-se que não existe diferença significativa entre os tratamentos conforme apresentado nos anexos. Dessa forma observa-se que não há diferença significativa para os valores médios da densidade quando se altera o tipo de aditivo. Ou seja, a mudança de aditivo não exerce influência na densidade do compósito.

Cabe observar ainda que o mesmo resultado foi obtido por autores que trabalharam com granulometrias maiores, ou seja, com material retido na malha 2,08 mm. Em outras palavras o tamanho da partícula não interfere no resultado final da densidade dos painéis. O mesmo fato ocorre para os diferentes aditivos.

4.4.2 Análise da absorção de água dos painéis

A - Análise em função da variação do aditivo

O resultado médio da análise da absorção de água obtido após duas horas e após vinte e quatro horas em função do tipo de aditivo utilizado pode ser observado pela tabela 24. Esses valores referentes às médias e aos coeficientes de variação consideram nesse momento somente aqueles para os aditivos independente do tipo de granulometria utilizado.

TABELA 24 - RESULTADO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DO ADITIVO (2 HORAS)

Aditivo	ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)			
	2 horas		24 horas	
	Média (%)	CV (%)	Média (%)	CV (%)
CaCl ₂	2,10 ab	42,77	4,66 a	25,33
MgCl ₂	2,80 a	34,37	5,59 a	22,51
Al ₂ SO ₄	1,52 b	68,53	3,97 a	38,96
Na ₂ SiO ₄	4,93 c	43,74	8,02 b	34,32

A figura 46 apresenta o resultado em forma de gráfico.

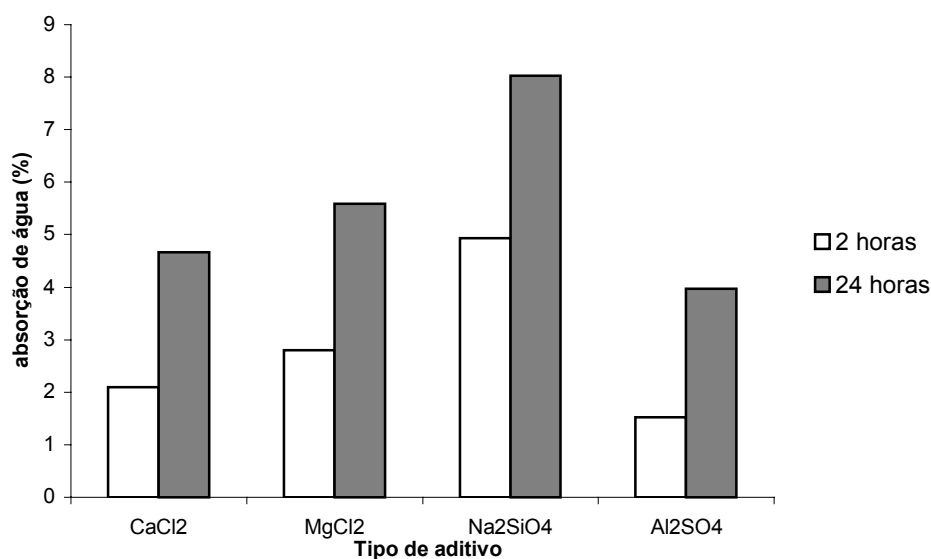


FIGURA 46 – ABSORÇÃO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DO TIPO DE ADITIVO

Conforme a tabela 24 a análise estatística mostra que não há diferença significativa entre os aditivos à base de cloro, tanto para o período de 2 horas. O mesmo fato pode ser observado quando se compara o aditivo cloreto de cálcio com o aditivo sulfato de alumínio. A diferença significativa entre as médias ficou para o aditivo a base de silicato de sódio, para ambos os períodos.

Outra constatação que se pode obter analisando a tabela 24 é o elevado coeficiente de variação. Tanto para a absorção com tempo de 2 horas quanto para a absorção com o tempo de 24 horas. Buscou-se justificar esse fato pelo alto grau de finura do pó de madeira que por absorver mais umidade que partículas mais grossas, transformam o compósito num elemento de maior variabilidade.

A diferença apresentada pelo aditivo silicato de sódio utilizado com o teor de 4% em função da massa de cimento, que permitiu uma maior absorção de água que os demais, pode ser justificada pelo fato de que, os aditivos a base de cloro e o sulfato de alumínio aumentam a quantidade de íons que reagindo com o C₃A presente no cimento, aceleram a pega permitindo a criação de um sistema mais compacto e por isso mais impermeável.

O silicato de sódio, no teor aplicado, tem uma ação maior sobre a madeira envolvendo-a e, com isso, protegendo-a do meio alcalino garantindo uma durabilidade maior.

O sulfato de alumínio diferencia-se dos demais aditivos pela forma de ação, pois reage com os componentes do cimento formando em maior quantidade um sal conhecido como etringita. A etringita, por sua vez, durante a reação do cimento com a água, se deposita como um fino material granular na superfície do clínquer impedindo o acesso de água de reação no clínquer e criando vazios. Isso permite uma maior absorção da água, sendo esta uma das causas da degradação do concreto em ambientes sulfatados. (SIMS, 2001).

B - Análise em função da variação da granulometria

O resultado médio da análise da absorção de água para duas e vinte e quatro horas em função da granulometria utilizado, ou seja, do tipo de pó, pode ser observado na tabela 25. Os valores apresentados das médias e os coeficientes de variação apresentam o comportamento de cada uma das granulometrias utilizadas neste trabalho.

TABELA 25 - RESULTADO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DA GRANULOMETRIA

Pó de madeira	ABSORÇÃO DE ÁGUA			
	2 horas		24 horas	
	Média (%)	CV (%)	Média (%)	CV (%)
1	3,47 a	54,93	6,06 a	39,03
2	2,53 a	71,57	4,71 a	42,57
3	3,12 a	75,75	5,97 a	44,60
4	2,49 a	71,11	5,52 a	39,68

Observa-se pela tabela 25 que tanto para o período de 2 horas quanto para o período de 24 horas os valores percentuais de absorção ficaram bastante próximos.

Outra constatação que pode-se obter analisando a tabela acima é o elevado coeficiente de variação, tanto para a absorção com tempo de 2 horas quanto para a absorção com o tempo de 24 horas. Analisando o aspecto granulométrico do pó de madeira, observa-se que o coeficiente de variação é menor para o período de 24 horas. Considerando que com a menor granulometria o material fica mais compacto, mais homogêneo, é de se esperar variações menores para períodos maiores. A figura 47 apresenta o resultado graficamente,

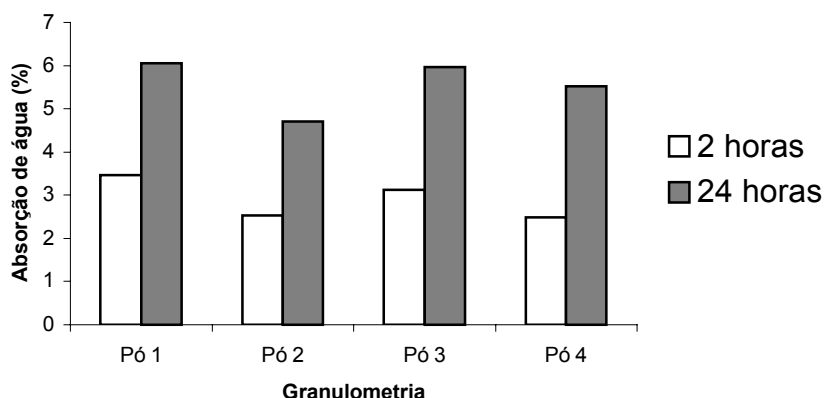


FIGURA 47 – ABSORÇÃO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DA GRANULOMETRIA

A figura 47 mostra a pequena diferença existente para a absorção de água entre as diversas granulometrias.

Buscando identificar se há alguma diferença significativa nos valores obtidos para cada tipo de granulometria utilizada, verificou-se que para os valores médios não existe diferença significativa, conforme apresentado na tabela 25. Esse resultado era esperado, pois a variância entre grupos é muito próxima da variância dentro do grupo. Esse fato ocorre porque nesta análise considerou-se todos os valores para uma mesma granulometria, independente do aditivo utilizado.

A diferença de comportamento dos aditivos pode ser explicada pela forma de ionização na mistura. Dessa forma, para acelerar a dissolução do cálcio, os íons ácidos devem possuir suficiente mobilidade para penetrar nas partículas de silicato presentes no cimento. Como consequência desse fato, o tamanho das partículas é de fundamental importância. Assim observa-se que o cloreto de cálcio tem um íon de tamanho muito pequeno, ou seja, de 0,27 nanômetros, menor que os íons do silicato.

Os aditivos à base de cloretos formam pequenos cristais em forma de fibras indicando assim que há uma rápida cristalização. O cloreto de cálcio acelera inicialmente a reação entre o C_3A e o gesso também presente no cimento. Os sulfatos reagem em primeiro lugar, seguido da reação do C_3A com o cloro formando a etringita, cristais longos, em forma de agulhas. Essa cristalização forma uma intrincada malha que torna a matriz mais compacta, mais impermeável, justificando assim o resultados dos ensaios.

O silicato de sódio é um sal metálico que tem solubilidade em água menor que a do cloreto de cálcio e isso, associado a menor mobilidade do ânion em relação ao

ion cloreto, faz com que esse aditivo tenha ação diferenciada como mostrada pelos resultados desses ensaios.

A análise gráfica do comportamento da absorção frente à variação do tipo de aditivo e da granulometria pode ser observada pela figura 48.

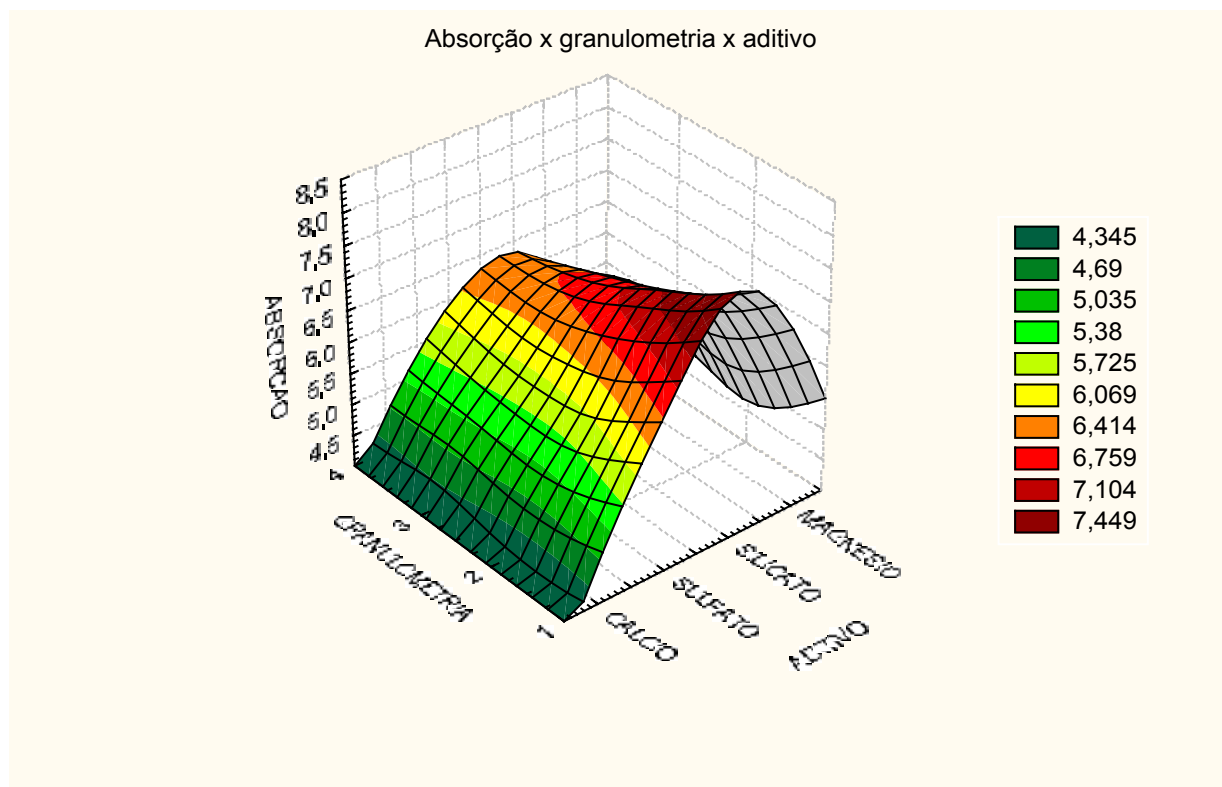


FIGURA 48 – ABSORÇÃO D'ÁGUA (24 HS) EM FUNÇÃO DA GRANULOMETRIA E DO ADITIVO

Observa-se pela figura 48 que as menores taxas de absorção foram obtidas pela combinação pó mais grosso e aditivo a base de cálcio. Por sua vez as maiores taxas de absorção ficaram por conta dos pós mais finos, quando combinados com outros aditivos.

4.4.3 Comportamento do inchamento em espessura dos painéis

O inchamento é uma importante propriedade física, pois pode influenciar na durabilidade desse material frente às variações de umidade a que estará sujeito em suas aplicações. O comportamento dessa propriedade segue a proposta adotada por

SHIGEKURA, (1994) e também proposta semelhante adotado por VENTA, (1994), ambos analisando a expansão linear.

A - Análise em função da variação do aditivo

A tabela 26 apresenta as médias do inchamento (%) e os coeficientes de variação, considerando os valores obtidos nos ensaios para cada aditivo, relacionando com granulometria utilizada.

TABELA 26 - VALORES MÉDIOS PARA O INCHAMENTO EM ESPESSURA (2 HORAS)

PÓ DE MADEIRA	INCHAMENTO EM ESPESSURA (%)							
	CaCl ₂	CV (%)	MgCl ₂	CV (%)	Na ₂ SiO ₄	CV (%)	Al ₂ SO ₄	CV (%)
1	0,61 a	58,51	0,75 a	56,50	0,25 a	88,61	0,77 a	45,44
2	1,48 b	48,27	0,63 ab	47,06	0,36 a	73,43	0,77 a	57,37
3	1,61 b	18,05	0,51 ab	67,31	0,36 a	79,77	0,55 a	73,80
4	0,68 a	66,78	1,13 b	39,09	0,33 a	76,68	0,73 a	71,82

Os coeficientes de variação são bastante elevados, ratificando o que já foi mostrado anteriormente, ou seja, o comportamento desse material leva a uma maior variação dessa propriedade entre os corpos de prova obtidos para o ensaio.

A análise estatística identificou diferenças entre as granulometrias utilizadas para os aditivos a base de cloro. Isto significa que a granulometria interferiu no processo de inchamento para o período de duas horas. Já para os aditivos a base de sulfato e de silicato não houve diferença significativa. Pode se justificar esse fato considerando a forma de atuação dos aditivos, pois aqueles a base de cloro atuam mais rapidamente devido a sua mobilidade iônica, diferente dos outros aditivos utilizados.

B - Análise em função da variação da granulometria para 2 horas

Os valores apresentados na tabela 27 das médias e os coeficientes de variação considerando os valores obtidos, para o inchamento em espessura, nos ensaios para cada granulometria em função do tipo de aditivo utilizado.

TABELA 27 - VALORES MÉDIOS PARA O INCHAMENTO EM ESPESSURA (2 HORAS)

ADITIVO	INCHAMENTO EM ESPESSURA (%)							
	1	CV(%)	2	CV(%)	3	CV(%)	4	CV (%)
CaCl ₂	0,68 ab	58,51	1,48 a	48,27	1,61 a	18,05	0,68 ab	66,78
MgCl ₂	1,13 b	56,50	0,63 b	47,06	0,51 b	67,31	1,13 b	39,09
Al ₂ SO ₄	0,33 a	88,61	0,36 b	95,02	0,36 b	79,77	0,33 a	76,68
Na ₂ SiO ₄	0,73 ab	67,91	0,76 ab	89,70	0,55 b	73,80	0,68 ab	71,82

Na tabela 27 observa-se que para o pó de granulometria intermediária como a 2 e o 3, apenas o aditivo cloreto de cálcio mostrou diferença significativa, tendo uma média de inchamento maior que os demais. Para o pó mais fino, apenas os aditivos a base de sulfato e cloreto de magnésio diferenciaram entre si, os demais não apresentam qualquer diferença significativa. O mesmo comportamento ocorreu para o pó mais grosso. Essas diferenças podem ser justificadas pela forma de atuação desses aditivos. O aditivo cloreto de cálcio interage fortemente com o cimento, diferente do silicato de sódio que atua na “mineralização” da madeira. Contudo o período de duas horas é relativamente curto para caracterizar esse fenômeno.

C - Análise em função da variação da granulometria para 24 horas

Os resultados médios da análise do inchamento em espessura para vinte e quatro horas em função do tipo de aditivo utilizado estão apresentados na tabela 28 e consideram os valores obtidos nos ensaios para cada aditivo, relacionando com a granulometria utilizada.

TABELA 28 - VALORES MÉDIOS PARA O INCHAMENTO EM ESPESSURA (24 HORAS)

PÓ DE MADEIRA	INCHAMENTO EM ESPESSURA (%)							
	CaCl ₂	CV(%)	MgCl ₂	CV(%)	Al ₂ SO ₄	CV(%)	Na ₂ SiO ₄	CV (%)
1	1,29 a	56,29	1,64 a	42,74	1,21 b	47,89	0,92 a	39,68
2	2,22 a	45,17	1,10 a	48,47	0,46 a	42,78	1,35a	35,85
3	1,89 a	42,62	1,01 a	37,18	0,55 a	45,80	1,32 a	47,35
4	1,40 a	68,38	1,75 a	25,42	0,55 a	37,72	1,16 a	31,63

Da tabela 28 observa-se que os aditivos à base de cloro tiveram comportamento semelhante, ou seja, não houve diferença significativa quando se alterou a granulometria. A única diferença que houve para o sulfato de alumínio foi uma diferença significativa entre o pó 1 (mais fino) e os demais. Esse fato pode ser explicado em funções de outros fatores intervenientes no processo de produção dos painéis. Para o silicato de sódio não houve diferença entre as diversas granulometrias.

Os coeficientes de variação são bastante elevados, ratificando o que já foi mostrado anteriormente, ou seja, a forma de atuação do pó mais fino leva a uma maior variação dessa propriedade entre os corpos de prova obtidos para o ensaio.

Esses valores estão próximos aos obtidos por VENTA, (1994) para compósitos a base de cimento e madeira. Os valores baixos justificam-se pelo fato de se tratar de um material com 75% de cimento e 25% de madeira, no qual o cimento tem expansão naturalmente baixa.

D - Análise em função da variação do aditivo para o período de 24 horas

Na tabela 29 estão apresentados os resultados do inchamento em espessura para o período de 24 horas considerando a variação dos aditivos em função da granulometria.

TABELA 29 - VALORES MÉDIOS PARA O INCHAMENTO EM ESPESSURA (24 HORAS)

ADITIVO	INCHAMENTO EM ESPESSURA (%)							
	1	CV(%)	3	CV(%)	2	CV(%)	4	CV (%)
CaCl ₂	1,29 a	56,29	2,22 a	45,17	1,89 a	42,62	1,40 ab	68,38
MgCl ₂	1,64 a	42,74	1,10 b	44,48	1,01 ab	37,18	1,75 b	28,49
Al ₂ SO ₄	1,21 a	47,89	0,46 b	42,78	0,55 b	45,80	0,55 a	37,62
Na ₂ SiO ₄	0,92a	39,68	1,35 ab	35,86	1,32 ab	47,86	1,16 ab	31,63

Observando a tabela 29 verifica-se que para o pó mais fino, 1, os valores não apresentaram diferenças significativas. O elevado coeficiente de variação justifica esse fato pois a variação entre grupos não foi significativamente maior que a variação interna ao grupo.

Por sua vez as granulometrias intermediárias mostraram comportamento semelhante entre si, onde o cálcio diferenciou dos demais aditivos e o silicato do

sulfato. Já para o pó mais grosso o cálcio e o magnésio tiveram comportamento semelhante, diferenciando porém do sulfato e este diferenciando do silicato.

Os valores para o coeficiente de variação são muito semelhantes para os diversos tipos de granulometria, quando se varia o aditivo e para os diversos tipos de aditivo quando se varia a granulometria. Esta elevada variação mostra que outros fatores afetam a produção desse painel.

De maneira geral observa-se que no período de 24 horas as influências dos aditivos podem ser verificadas o que não ocorre para o período de duas horas. Ainda, os aditivos a base de cloro tiveram comportamento diverso tendo valores maiores de inchamento.

4.4.4 Comportamento do MOR e MOE na compressão

A - Análise da variação do módulo de ruptura em função do tipo de aditivo.

Os resultados do ensaio de compressão em função do tipo de aditivos estão apresentados na tabela 30, onde se relaciona o módulo de ruptura (MOR) para cada tipo granulometria em função do aditivo utilizado.

TABELA 30 - EFEITO DOS ADITIVOS SOBRE O MÓDULO DE RUPTURA (Kgf/cm²)

MÓDULO DE RUPTURA								
ADITIVO	1	CV(%)	2	CV(%)	3	CV(%)	4	CV (%)
CaCl ₂	169,74 a	21,54	191,35 a	5,05	166,53 a	17,66	197,48 a	9,32
MgCl ₂	142,49 b	21,21	169,48 a	23,39	208,78b	15,49	198,80 a	10,07
Al ₂ SO ₄	139,17bc	14,30	184,35 a	15,58	140,60c	22,74	129,12 b	22,39
Na ₂ SiO ₄	113,90c	25,58	140,97b	23,51	117,87c	8,38	121,73b	6,73

Conforme apresentado na tabela 30, para a granulometria mais fina, o cloreto de cálcio diferenciou-se significativamente dos demais aditivos e com valor expressivo. O silicato por sua vez apesar de não mostrar diferença significativa com o sulfato apresenta os menores valores médios para o módulo de ruptura. Dessa forma, os valores do módulo de ruptura (MOR) foram maiores para os aditivos a base de cloro e menores para aqueles à base de sulfato ou de silicato de sódio. Pode se justificar esse fato da mesma forma como foi justificado na análise do comportamento da densidade e expansão para os aditivos, ou seja, a eficiência dos aditivos à base

de cloro se deve a maior capacidade de dissolução dos componentes do cimento que por sua vez é devido a maior mobilidade iônica devido ao menor tamanho dos íons.

Para o pó de número 3, com exceção dos aditivos à base de sulfato e silicato, todos os demais foram diferentes entre si sendo observado desta feita que novamente os aditivos à base de cloro forneceram os maiores valores. Já para o pó de número 2, o silicato foi o único aditivo que diferenciou significativamente e com os menores valores. Finalmente para o pó de número 4, o mais grosso os aditivos à base de cloro diferenciaram significativamente dos demais fornecendo valores mais elevados.

O coeficiente de variação foi homogêneo para o MOR e seus valores são próximos aos que foram obtidos em outras pesquisas. A figura 49 apresenta graficamente os valores do módulo de ruptura em função do tipo de aditivo.

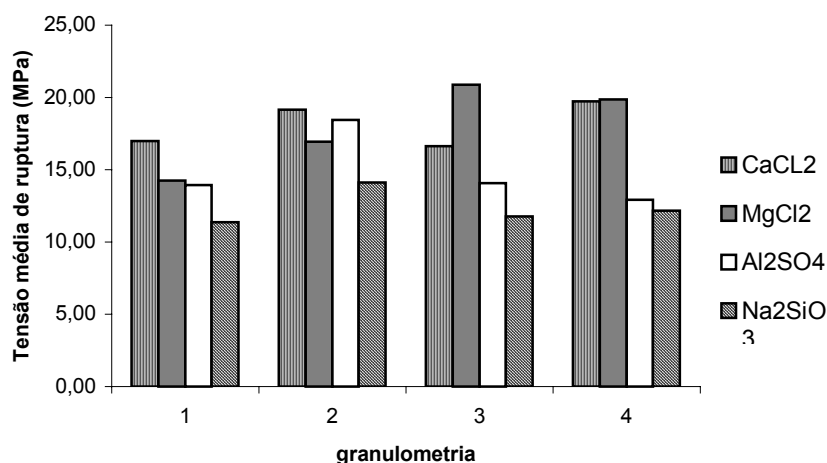


FIGURA 49 –VARIÇÃO DO MÓDULO DE RUPTURA EM FUNÇÃO DA GRANULOMETRIA

Observa-se na figura 49 uma tendência ao aumento do módulo de ruptura à compressão a medida que se aumenta o módulo de finura, ou seja, altera-se para granulometrias mais grossas.

Os valores obtidos para o módulo de ruptura foram bastante elevados quando comparados aos trabalhos de LATORRACA (2000) e de GRANDI (1995). O primeiro encontrou valores médios entre 3,4 a 6,0 MPa e o segundo achou valores de 3,0 a 9,0 MPa. Os valores aqui obtidos variam de 12 a 18 MPa.

A justificativa dessas diferenças está nos seguintes aspectos:

- a) O material utilizado nesse experimento é de uma granulometria muito fina, o que pode gerar uma maior homogeneidade do compósito, ou seja, as partículas de madeira se distribuem de forma mais eqüitativa no corpo de prova equilibrando a distribuição das tensões levando um melhor resultado.
- b) O material utilizado por GRANDI (1995) também foi o pó de madeira, mas foi um material de origem não controlada, obtido junto aos equipamentos de corte de serrarias. Diferente do material utilizado neste trabalho que tem origem controlada tanto na espécie da madeira utilizada quanto na granulometria especificada. Esse controle do material permite uma melhor uniformidade na distribuição granulométrica o que pode gerar uma maior resistência final.
- c) A relação cimento/madeira para esse trabalho é de 4:1, maior que os trabalhos dos autores acima citados o que leva naturalmente a um maior valor da resistência à compressão.
- d) A densidade alvo deste trabalho também foi maior do que aquelas trabalhadas em outros trabalhos. Esse fator também leva a obtenção de valores mais elevados.

B - Análise da variação do módulo de elasticidade em função do tipo de aditivo

Na tabela 31 estão apresentados os valores do módulo de elasticidade para cada granulometria em função da variação do aditivo.

TABELA 31 - EFEITO DOS ADITIVOS SOBRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE

ADITIVO	MÓDULO DE ELASTICIDADE (Kgf/cm ²)							
	1	CV(%)	2	CV(%)	3	CV(%)	4	CV (%)
CaCl ₂	30.917,8a	46,11	35.212,1 a	32,70	31.566,8 a	27,97	37.992,7 a	18,93
MgCl ₂	21.628,6a	19,10	32.496,8 a	27,64	36.433,8 a	20,99	28.778,7 b	16,04
Al ₂ SO ₄	21.044,6b	15,04	32.981,6 a	21,10	24.723,1b	26,81	22.891,8 c	22,94
Na ₂ SiO ₄	45.637,5c	40,87	46.591,0 b	39,04	17.310,3 b	27,18	20.195,2 d	16,41

De acordo com os dados da tabela 31 o comportamento para granulometrias mais finas foi similar ao que ocorreu para o módulo de ruptura, mostrando um mesmo efeito dos aditivos. Já para o pó de número 4 (mais grosso) o efeito foi distinto para cada tipo de aditivo, sendo todos significativamente diferentes entre si.

Uma vez que o módulo de elasticidade é a relação entre a tensão e a deformação e que para a tensão isoladamente a variabilidade é igual para todos os aditivos, conclui-se que esse aditivo influenciou o corpo de prova na sua deformação, fornecendo valores diferenciados.

Cabe observar, contudo, que, quando se utilizou corpos de prova cilíndricos com teor de 7,5 % de pó de madeira, obteve-se valores do módulo de elasticidade maiores que o mínimo especificado para o cimento puro e novamente maiores que os valores obtidos por outros autores.

A figura 50 apresenta graficamente o comportamento do módulo de ruptura em função do tipo de aditivo utilizado.

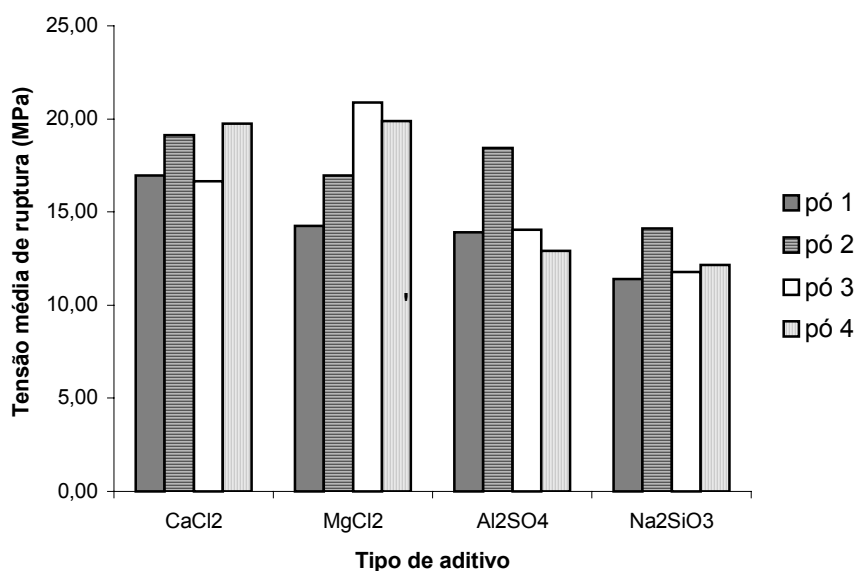


FIGURA 50 – RELAÇÃO DO MÓDULO DE RUPTURA COM OS ADITIVOS E GRANULOMETRIAS

Na figura 50 observa-se visualmente a diferença entre os aditivos à base de cloro e os demais. Ainda, a mesma figura mostra que o pó mais grosso tende a apresentar valores maiores para a resistência à compressão. A análise estatística mostra que existe diferença significativa entre os aditivos. Verifica-se que o silicato é o aditivo que difere significativamente dos demais justamente por ter o menor valor. A figura 51 confirma esse fato.

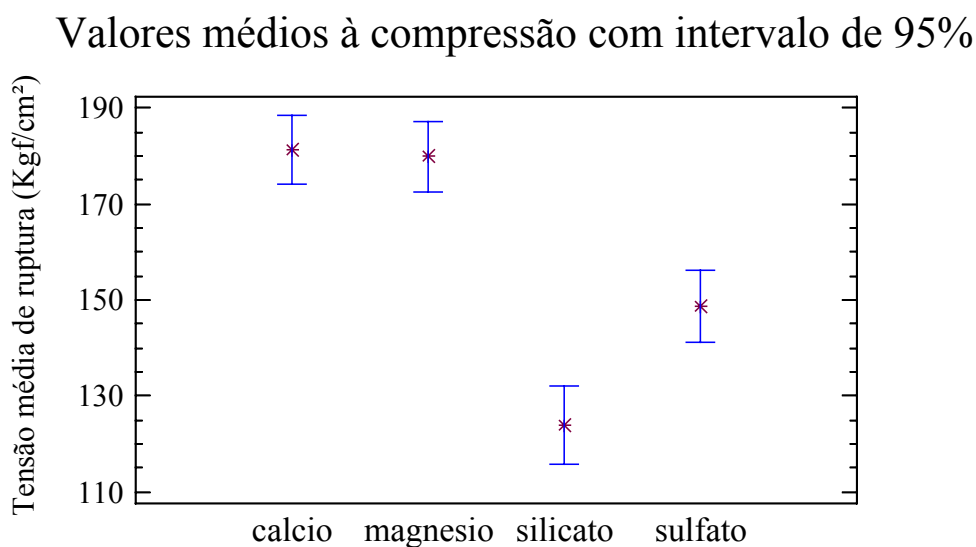


FIGURA 51 - VALORES MÉDIOS PARA O MÓDULO DE RUPTURA COM SIGNIFICÂNCIA DE 95%

A figura 46 mostra graficamente os mesmos resultados obtidos nos testes, ou seja, o limite superior dos valores médios da resistência à compressão, para o aditivo silicato de sódio, é inferior ao limite inferior correspondente ao aditivo à base de sulfato que por sua vez é inferior aos aditivos a base de cloro.

Esse aditivo tem influência menor que os demais para esse teor uma vez que teores superiores a 13% tornam esse aditivo um acelerador de pega, o que pode aumentar a resistência final à compressão.

Um dos objetivos do silicato, que atua envolvendo as partículas de madeira, é protegê-la da alcalinidade do cimento aumentando assim sua vida útil do compósito. Essa proteção acaba alterando o comportamento da interação entre os cristais do cimento e a madeira resultando um valor menor da resistência à compressão.

Analisando os valores obtidos do módulo de ruptura, mantendo constante o aditivo cloreto de cálcio e variando apenas a granulometria, a análise da variância mostra que não existe diferença significativa para 95% de confiança entre as diversas granulometrias, mostrando que esse aditivo juntamente com o cimento tem influencia decisiva nos resultados obtidos. O mesmo ocorre para o módulo de elasticidade.

O pó mais fino teve comportamento diferenciado junto ao aditivo cloreto de magnésio. Novamente justifica-se pela granulometria desse pó, pois, foi a menor

média entre todas. Saliente-se, no entanto, que o valor de 14,3 MPa é comparativamente elevado quando comparado aos valores de outros autores.

Quando se efetua a análise da variância para o aditivo à base de sulfato de alumínio, verifica-se que há diferença entre as granulometrias, onde o pó de número 2, de granulometria media apresentou valores médios na ordem de 18,4 MPa diferenciando das demais que ficaram em torno de 14,0 MPa. A distribuição granulométrica mais uniforme desse pó pode ter influenciado nesses valores.

Finalmente, realizando a análise da variância para o aditivo a base de silicato de sódio, verifica-se que não há diferença significativa entre as diversas granulometrias para o valor do módulo de ruptura e do módulo de elasticidade. O pó de número 2 é o que apresenta valores superiores com média igual a 14,1 MPa. O mesmo ocorre para o módulo de elasticidade. Novamente a forma de atuação desse aditivo, servindo como barreira aos álcalis do cimento faz com que a alteração granulométrica diminua sua influência no resultado desses ensaios.

C - Análise do módulo de ruptura em função da variação da granulometria

Os valores apresentados na tabela 32 das médias e os coeficientes de variação consideram os valores obtidos nos ensaios para cada granulometria em função do tipo de aditivo utilizado.

TABELA 32 – EFEITO DA GRANULOMETRIA SOBRE O MÓDULO DE RUPTURA (Kgf/cm²)

PÓ DE MADEIRA	MÓDULO DE RUPTURA							
	CaCl ₂	CV(%)	MgCl ₂	CV(%)	Al ₂ SO ₄	CV(%)	Na ₂ SiO ₄	CV (%)
1	169,74ab	21,54	142,49a	21,21	139,17a	14,30	130,32 a	38,32
2	191,35ab	5,05	169,48b	23,39	184,35b	15,58	156,71ab	36,99
3	166,53ab	17,66	208,78b	15,49	140,60a	23,97	146,35ab	41,13
4	197,48 a	29,32	198,80b	10,07	129,12 a	22,39	150,43ab	42,62

De acordo com a tabela 32, os valores do módulo de ruptura são menores para granulometria mais fina. Corroborando o que foi afirmado na análise da densidade, essa granulometria dificulta a trabalhabilidade e pelo fato de ter maior absorção de água leva a uma menor resistência. Essa granulometria obteve também

um módulo de elasticidade relativamente baixo devido a sua maior deformação média.

D - Análise do módulo de elasticidade em função da variação da granulometria

TABELA 33 – EFEITO DA GRANULOMETRIA SOBRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE (Kgf/cm²)

PÓ DE MADEIRA	MÓDULO DE ELASTICIDADE							
	CaCl ₂	CV(%)	MgCl ₂	CV(%)	Al ₂ SO ₄	CV(%)	Na ₂ SiO ₄	CV (%)
1	30917,8 a	46,11	21628,6 a	19,10	21044,6 a	15,04	19182,3 a	51,00
2	31566,8 a	27,97	36433,8 bc	20,99	26474,8 c	21,69	17041,2 a	46,98
3	35212,1 a	32,70	32496,8 c	27,64	32981,6 b	21,10	49458,9 b	43,39
4	37992,7 a	18,93	28778,7 b	16,04	22891,8 ab	22,94	20195,2 a	45,07

N tabela 33 verifica-se que para o aditivo cloreto de cálcio a mudança de granulometria não gerou nenhuma diferença significativa entre os valores. Para os demais aditivos a granulometria mais fina diferenciou-se das outras fornecendo o menor valor para o módulo de elasticidade. Pode-se inferir, dessa forma, que a interação entre o cloreto de cálcio e o cimento é suficientemente maior que a alteração que a mudança de granulometria gera. Observou-se também, que a combinação desses aditivos com a granulometria mais fina levou a uma maior deformação, resultando num menor módulo de elasticidade.

Os coeficientes de variação mantiveram comportamento semelhante aos resultados anteriores sendo que o aditivo silicato de sódio forneceu maior variabilidade devido a sua forma de atuação.

A figura 52 apresenta a distribuição dos valores médios para o módulo de elasticidade.

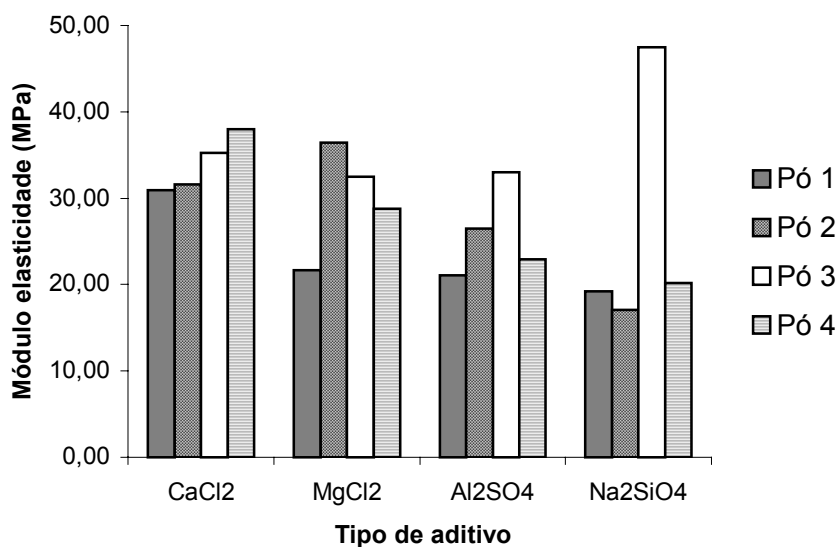


FIGURA 52 –MOE PARA OS DIVERSOS TIPOS DE GRANULOMETRIA.

Na figura 52 observa-se que os aditivos à base de cloro forneceram valores mais elevados para o módulo de elasticidade, podendo-se inferir dessa maneira, que a interação com a matriz cimentícia é maior para esses aditivos.

A análise estatística demonstrou que há diferença significativa entre as médias e que o pó mais fino é o que se diferenciou dos demais. Observa-se, no entanto, que ainda assim o valor de 14,32 MPa é alto quando comparado a resultados de outros trabalhos.

O mesmo ocorreu quando se aplicou o tratamento estatístico para o módulo de elasticidade, indicando a granulometria mais fina como a que obteve menor valor para o módulo de elasticidade, revelando assim, maior deformação relativa.

Analisando a eficiência do aditivo dentro de cada granulometria, verificou-se que para o pó de número 3, o aditivo que se revelou mais eficiente foi o aditivo à base de cloreto de magnésio, ficando o pior valor para o silicato de sódio. Novamente se confirma a eficiência dos aditivos a base de cloro em detrimento dos demais.

A mesma análise para o pó de número 2 mostrando que o aditivo mais eficiente foi o cloreto de cálcio e o pior desempenho novamente coube ao silicato de sódio ainda que, com valores elevados.

A granulometria mais fina mostrou uma repetição do comportamento do pó anteriormente citado. Ou seja, o aditivo a base de cloreto de cálcio foi o melhor e o a

base de silicato de sódio foi o de mais baixo valor médio. Observa-se ainda que os valores médios, comparando-se os mesmos aditivos, foram sempre menores para essa granulometria, mostrando assim a influência negativa da granulometria. Em outras palavras, quanto menor a granulometria para o pó de madeira, pior o resultado para os teores de 4% de aditivos.

Finalmente analisando a granulometria mais grossa, verifica-se que os aditivos à base de cloro tiveram estatisticamente os mesmos valores médios, superiores aos valores dos aditivos a base de sulfato e de silicato, que por sua vez foram muito menores. Cabe observar ainda que esta granulometria teve os mais altos valores médios entre todas as outras, juntamente com os cloretos.

E - Relação densidade x módulo de ruptura e módulo de elasticidade na compressão

O comportamento da relação entre as densidades médias e ambos os parâmetros tem a mesma tendência conforme observado por WOLFE e GNOLLI, (1994). Ou seja, há uma tendência ao crescimento dos valores com o aumento da densidade. A figura 53 mostra a relação obtida entre o módulo de ruptura e a densidade. Os valores utilizados para a determinação dessa relação são os valores médios da tensão de ruptura e da densidade para cada aditivo.

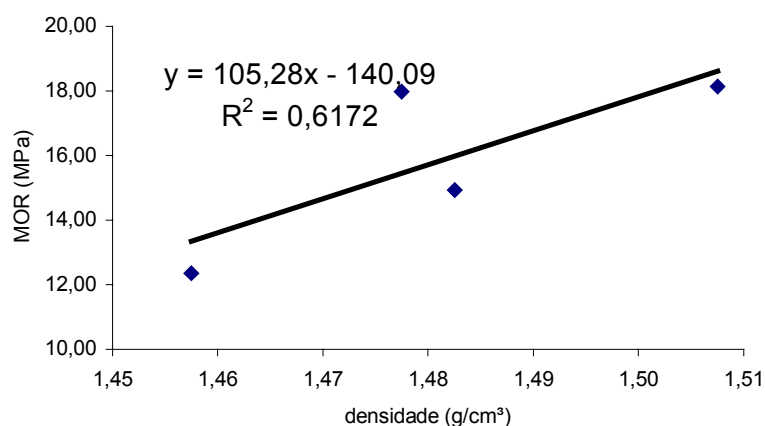


FIGURA 53 – RELAÇÃO ENTRE DENSIDADE E MOR

Através da figura 53, Observa-se, um significativo valor da correlação. Em outras palavras, a mudança de aditivo altera o valor da densidade e altera da mesma forma o valor do módulo de ruptura.

Cabe observar, no entanto, que estatisticamente não existe diferença significativa para o valor da densidade quando se altera o aditivo. O gráfico mostra uma tendência de crescimento, apenas.

Ainda, ao adotar-se o mesmo procedimento para a variação da granulometria, o valor do coeficiente de correlação fica abaixo de 20%, mostrando que a alteração da granulometria não gera o mesmo comportamento dos aditivos.

Utilizando-se do mesmo procedimento para o módulo de elasticidade, obtém-se o seguinte resultado: figura 54.

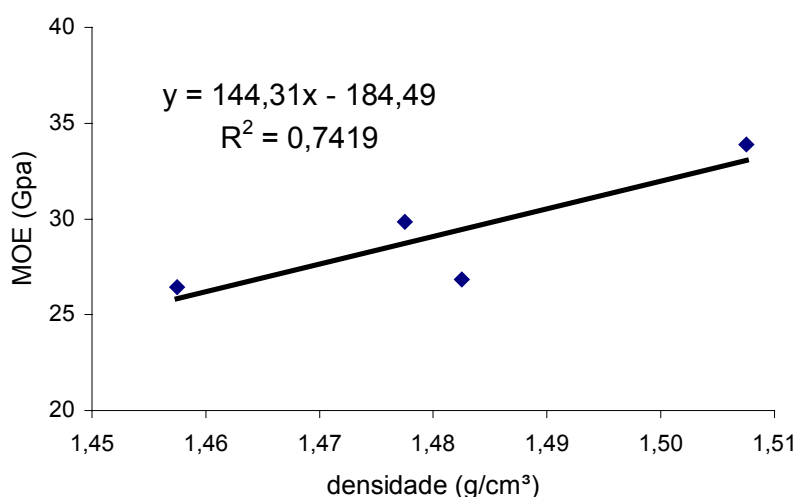


FIGURA 54 – RELAÇÃO ENTRE DENSIDADE E MOE

Comparando este gráfico apresentado na figura 54 com o apresentado na figura 53 verifica-se que o coeficiente de correlação aqui é maior, confirmando a tendência. Valem as mesmas observações feitas com referência à granulometria.

F - Análise gráfica do MOR e MOE na compressão

O comportamento do módulo de ruptura e módulo de elasticidade frente a variação do tipo de aditivo e da granulometria pode ser visualizado nas figuras e 55 e 56.

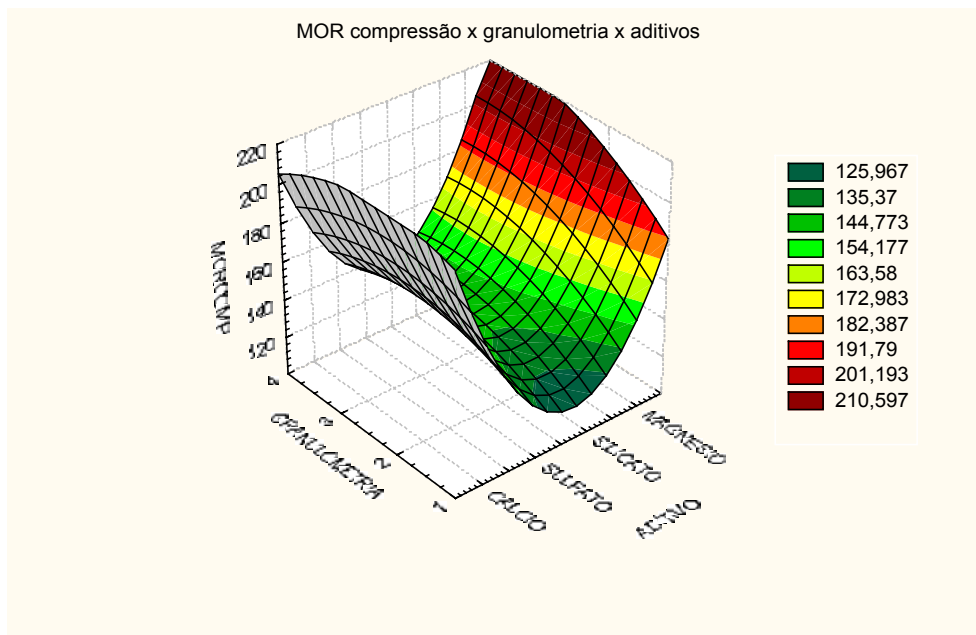


FIGURA 55 - RELAÇÃO MOR X GRANULOMETRIA X ADITIVO NA COMPRESSÃO

Na figura 55 observa-se que os aditivos a base de cloro forneceram os melhores resultados independente da granulometria. Por sua vez, a combinação dos aditivos a base de cloro com a granulometria mais grossa forneceram o melhor resultado para o módulo de ruptura na compressão.

De forma semelhante à figura 56 apresenta a relação entre os aditivos, granulometria e módulo de elasticidade à compressão simultaneamente.

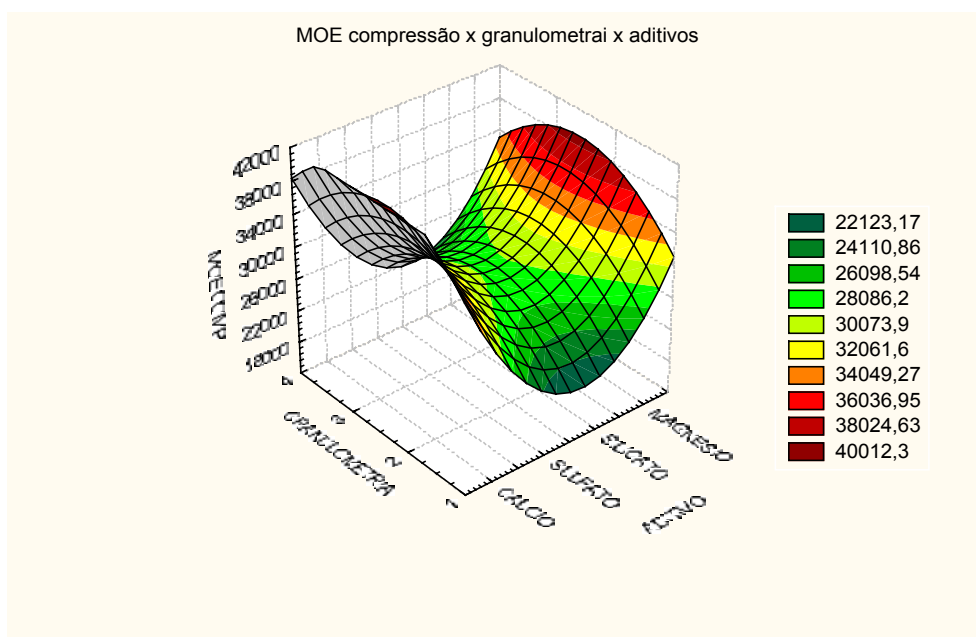


FIGURA 56 – RELAÇÃO MOE X GRANULOMETRIA X ADITIVO NA COMPRESSÃO

Comportamento semelhante observa-se para o módulo de elasticidade na qual a diferença com o módulo de ruptura está no fato de que o aditivo à base de cloro de magnésio foi tão eficiente quanto o cloreto de cálcio apenas para a o pó de número 3, mantendo o mesmo comportamento para as demais. Aqui novamente a combinação pó de madeira de maior granulometria com cloreto de cálcio mostrou os melhores resultados.

4.4.5 Comportamento do MOR e MOE na flexão estática

A granulometria muito fina do pó de madeira, segundo alguns autores, gera um efeito inibidor e por isso leva a resultados mais baixos no módulo de ruptura e de elasticidade no ensaio à flexão, pois a diminuição no comprimento da fibra reduz a resistência à tração. No entanto outro fator que deve ser considerado é o grau de compactação do compósito que pode compensar o efeito da redução do comprimento.

A - Análise do módulo de ruptura em função da variação do aditivo

Os resultados do ensaio de flexão em função do tipo de aditivo estão apresentados na tabela 34, onde se relaciona o módulo de ruptura (MOR).

TABELA 34 – EFEITO DOS ADITIVOS SOBRE O MOR NA FLEXÃO ESTÁTICA (Kgf/cm²)

MÓDULO DE RUPTURA								
ADITIVO	1	CV(%)	2	CV(%)	3	CV(%)	4	CV (%)
CaCl ₂	51,67 a	12,06	53,53 a	16,32	53,70 a	14,62	60,35 a	29,99
MgCl ₂	21,01 b	44,48	66,91 b	11,81	52,40 a	20,94	32,57bc	41,81
Al ₂ SO ₄	43,60 b	19,25	62,23 b	10,95	50,87 a	13,82	46,76 c	16,22
Na ₂ SiO ₄	36,61 c	22,05	46,81 a	24,27	29,00 b	29,77	40,17 b	20,00

Analisando a tabela 34 observa-se que na média o valor do módulo de ruptura (MOR) é maior para o cloreto de cálcio seguido do sulfato de alumínio. Diferentemente do que ocorreu no ensaio à compressão o cloreto de magnésio teve valores, em média menores. O silicato de sódio manteve o mesmo comportamento quando comparado à compressão, ou seja, obteve os menores valores. O coeficiente

de variação manteve-se na mesma ordem de magnitude, em torno de 20%, exceto para o silicato que teve um comportamento mais dispersivo.

A análise estatística revela que o aditivo cloreto de cálcio tem diferença significativa para 3 tipos de granulometria, sendo o valor maior em relação aos demais aditivos. A exceção ficou para a granulometria intermediária que indicou valores significativamente maiores para o cloreto de magnésio e o sulfato de alumínio. De qualquer forma fica claro que independente da granulometria utilizada os aditivos a base de cloro fornecem os melhores valores.

Por outro lado o silicato de sódio apresentou diferenças significativas e valores menores para todos os tipos de aditivos. Mesmo para a o pó de número 2, cujos valores foram comparáveis ao do aditivo cloreto de cálcio, sua média foi inferior. Assim, pode-se inferir que para o teor de 4% o silicato de sódio não tem o mesmo efeito, no módulo de ruptura à flexão, que os demais aditivos.

B - Análise da variação do módulo de elasticidade em função da variação do aditivo

A tabela 35 mostra os resultados para o módulo de elasticidade no ensaio à flexão em função do tipo de aditivo utilizado.

TABELA 35 – EFEITO DOS ADITIVOS SOBRE O MOE NA FLEXÃO ESTÁTICA (Kgf/cm²)

ADITIVO	MÓDULO DE ELASTICIDADE							
	1	CV(%)	2	CV(%)	3	CV(%)	4	CV(%)
CaCl ₂	24.684,3 ab	24,71	26.092,3 a	27,36	25.535,9 a	17,09	32.708,5 a	21,55
MgCl ₂	29.959,1 b	38,63	32.244,0 b	16,45	26.717,6 a	20,93	32.526,7 a	47,79
Al ₂ SO ₄	21.595,3 a	17,26	32.223,1 b	11,29	24.434,6 a	16,79	22.264,2 b	18,54
Na ₂ SiO ₄	19.957,4 a	27,72	23.678,4 a	28,12	12.675,9 b	29,62	18.246,6 b	29,01

O módulo de elasticidade foi maior para os aditivos à base de cloro e menor para os demais, sendo significativamente mais baixo para o silicato de sódio. Por sua vez o coeficiente de variação foi maior para o silicato comprovando, o mesmo comportamento quando se analisou a resistência à compressão.

Demonstra-se assim, pela segunda vez, que o silicato de sódio quando utilizado como aditivo exclusivo, não fornece valores comparáveis aos demais aditivos. Justifica-se esse fato pela forma de atuação do silicato, que consiste no isolamento

da partícula de madeira, o que não é suficiente para garantir maior resistência à flexão à peça e menor deformabilidade.

Resultados obtidos por outros autores, que utilizaram partículas bem maiores, mostram que os aditivos à base de cloro são melhores para os parâmetros de compressão e flexão e, esse trabalho comprova o mesmo resultado para partículas microscópicas. Assim pode-se inferir que, independentemente do tamanho da partícula de madeira, a interação entre o aditivo e os componentes do cimento é que vai determinar o comportamento final do compósito. A madeira, aqui, entra como redutor da densidade e do custo além da questão ecológica já apresentada na revisão bibliográfica deste trabalho.

Buscando a mesma comparação para os resultados do módulo de ruptura, verifica-se que os valores aqui obtidos são superiores aos apresentados por outros autores para a granulometria fina, sendo inferiores apenas para uma dada espécie e para o aditivo cloreto de cálcio.

Dessa forma, confirma-se a expectativa de que fibras maiores, para espécies compatíveis, fornecem melhores condições para resistir à tração e conseqüentemente à flexão. No entanto fibras de comprimento menores, como a desse trabalho fornecem valores relativamente elevados.

Com referência ao módulo de elasticidade, o que se observa é que em todas as situações os valores foram maiores aos obtidos por aqueles autores que usaram fibras maiores. Esse fato pode ser explicado devido à menor deformabilidade a que está sujeita a matriz de cimento cujo percentual é maior que aos do trabalho que ora se compara.

A figura 57 mostra graficamente o módulo de ruptura conforme o tipo de aditivo utilizado.

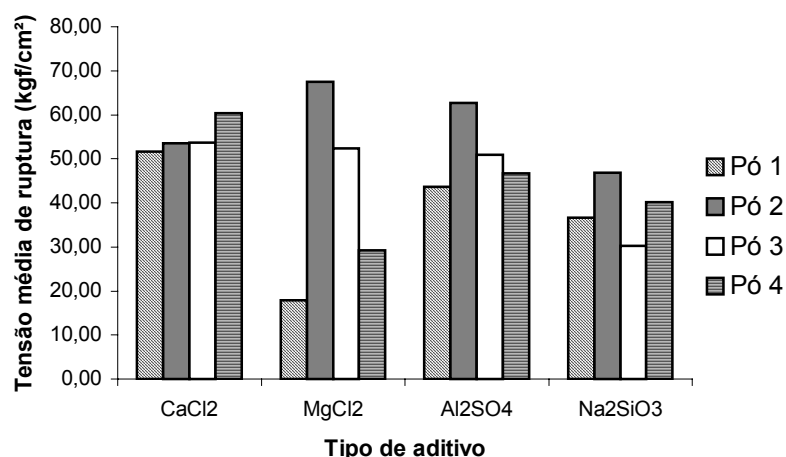


FIGURA 57 – VALORES DO MODULO DE RUPTURA NA FLEXÃO PARA CADA ADITIVO

Observa-se na figura 57 que o aditivo a base de silicato de sódio têm valores inferiores para as granulometrias intermediárias, na qual os aditivos a base de cloro apresentam valores maiores.

A análise estatística confirma a diferença entre os valores encontrados tanto para o MOR quanto para o MOE, confirmando o que já havia sido observado. O silicato de sódio é o aditivo que estatisticamente fornece os menores valores para a flexão. Os valores limites para as médias encontradas podem ser observados na figura 58.

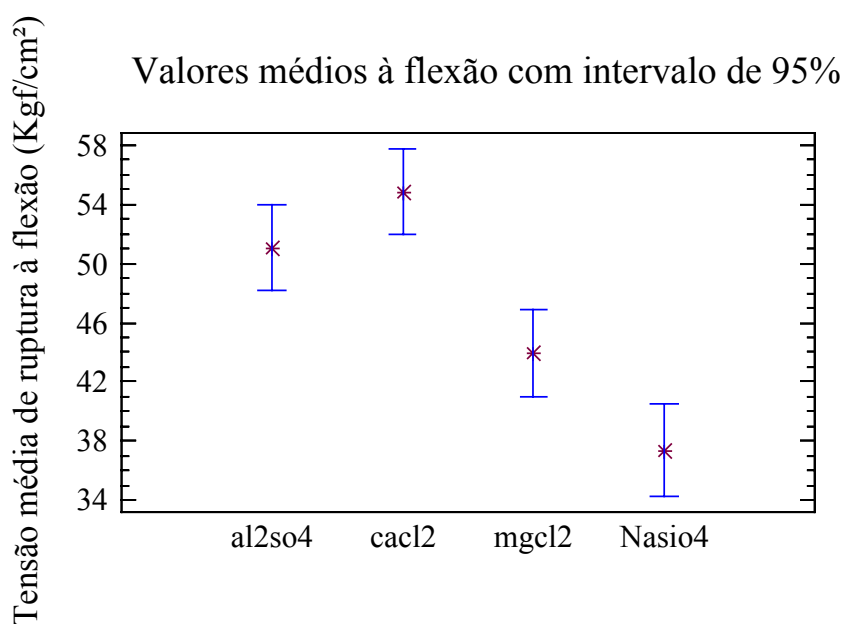


FIGURA 58 – VALORES MÉDIOS COM INTERVALO DE 95%

Na figura 58, observa-se que os valores superiores para o aditivo à base de silicato de sódio são inferiores aos menores limites para outros aditivos, considerando o intervalo de confiança de 95%.

C - Análise do módulo de ruptura em função da variação da granulometria

Para esta análise foram analisados os valores obtidos para as granulometrias em função do tipo de aditivo.

Na tabela 36, observa-se os valores do módulo de ruptura e do módulo de elasticidade obtidos para as diversas granulometrias.

TABELA 36 – VALORES DO MOR À FLEXÃO EM FUNÇÃO DA GRANULOMETRIA. (Kgf/cm²)

PÓ DE MADEIRA	MÓDULO DE RUPTURA							
	CaCl ₂	CV(%)	MgCl ₂	CV(%)	Al ₂ SO ₄	CV(%)	Na ₂ SiO ₄	CV (%)
1	51,67 a	12,06	21,01 a	44,48	43,60 a	19,25	36,61 ab	22,05
2	53,70 a	14,62	52,40 b	20,94	50,87 c	13,82	29,00 c	29,77
3	53,53 a	16,32	66,91 c	11,81	62,23 b	10,95	46,81 a	24,27
4	60,35 a	29,99	32,57 d	41,81	46,76 ab	16,22	40,17 bc	20,00

Os valores do módulo de ruptura para a flexão apontam os menores valores para o pó mais fino, não implicando, no entanto, em um maior valor para O pó mais grosso. A granulometria intermediária é a que apresentou o maior valor.

O coeficiente de variação manteve o mesmo comportamento quando foram analisados os parâmetros anteriores. Trabalhos de outros autores, apresentaram valores para esse coeficiente muito semelhantes aos ora aqui obtidos. Isso se justifica pelo fato de que o equipamento utilizado para a mistura, a betoneira, pode ter alguma influência, aliado ao fato de se utilizar a madeira que tem um comportamento muito diferente de outros agregados, como a areia, por exemplo.

A análise estatística revela que a interação entre o aditivo cloreto de cálcio e o cimento é suficientemente forte a ponto de suplantar o efeito da granulometria, pois não houve diferença significativa entre seus resultados.

O mesmo não ocorreu com o cloreto de magnésio onde o efeito da granulometria mais fina pode ser observado pela sua baixa média do módulo de ruptura. Os demais aditivos apresentaram valores distintos sendo que o sulfato de

alumínio também teve seu menor valor para a granulometria mais fina e o silicato de sódio para as de granulometrias intermediárias.

D - Análise da variação do módulo de elasticidade em função da granulometria

A tabela 37 apresenta os valores do módulo de elasticidade obtidos através do ensaio à flexão em função da variação da granulometria.

TABELA 37 –EFEITO DA GRANULOMETRIA MÓDULO DE ELASTICIDADE (Kgf/cm²)

PÓ DE MADEIRA	MÓDULO DE ELASTICIDADE							
	CaCl ₂	CV(%)	MgCl ₂	CV(%)	Al ₂ SO ₄	CV(%)	Na ₂ SiO ₄	CV (%)
1	24.684,3a	24,71	29.959,1a	38,63	21.595,3a	17,26	19.957,4 bc	27,72
3	25.535,9b	17,09	26.717,6a	20,93	24.434,6a	16,79	12.675,9 a	29,62
2	26.092,3b	27,36	32.244,0a	16,45	32.223,1b	11,29	23.678,4 c	28,12
4	32.708,5b	21,55	32.526,7a	47,79	22.264,2a	18,54	18.246,6 b	29,01

Para o módulo de elasticidade, os valores obtidos foram muito próximos para todas as granulometrias. Exceto para a o pó número 3. Novamente o que apresentou menor relação tensão deformação foi o pó de número 4, com o menor coeficiente de variação.

O pó mais fino obteve os menores valores, tanto para a compressão quanto para o ensaio à flexão, mostrando que seu comportamento reológico pode influenciar nos resultados.

Comparando esse resultado com o de outros autores, verifica-se que são muito semelhantes. Lembrando, no entanto, que o teor de cimento utilizado aqui é maior. Ainda, deve-se considerar que o cimento tem baixa resistência à flexão e o pó de madeira mostrou importante influência nos resultados.

Graficamente pode observar-se na figura 59 os valores para o módulo de ruptura em MPa e para o módulo de elasticidade em GPa.

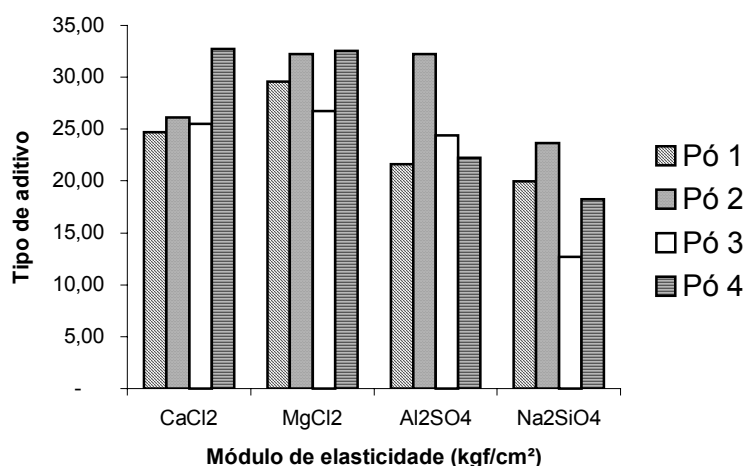


FIGURA 59 – RELAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE E OS TIPOS DE ADITIVOS

Observa-se na figura 59 que os aditivos a base de cloro fornecendo os valores mais elevados para o módulo de elasticidade justificado pelo fato de ter menor deformabilidade devido a sua interação com cimento onde este último passa a ter mais influência nesta situação que os demais aditivos.

A análise estatística para o módulo de elasticidade revela o cloreto de cálcio com os menores valores para o pó mais fino, indicando uma maior deformabilidade nesse compósito. O cloreto de magnésio não mostrou diferença significativa quando variou a granulometria. O sulfato de alumínio teve seu melhor comportamento para o pó de granulometria intermediária. O silicato de sódio novamente ficou caracterizado pelos seus baixos valores, indicando também a existência de maior deformabilidade nos corpos de prova, feito com esse aditivo.

E - Relação densidade & MOE e MOR na flexão

Da mesma forma como foi feito para os resultados dos ensaios à compressão, compara-se aqui os valores obtidos com os valores médios das densidades das chapas. A figura 60 mostra a relação obtida entre o módulo de ruptura e a densidade. Observa-se neste gráfico uma tendência ao crescimento da resistência com o aumento da densidade, a exemplo do que ocorreu quando se relacionou a densidade com a resistência à compressão.

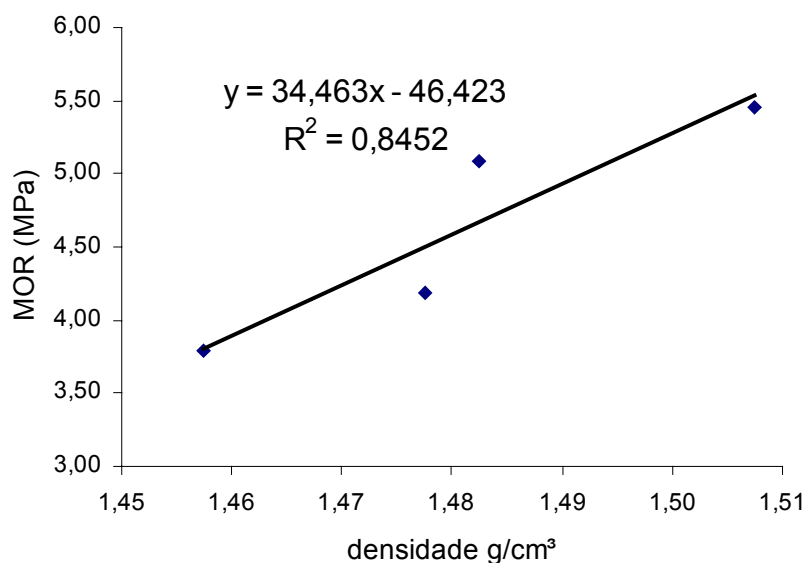


FIGURA 60 – RELAÇÃO ENTRE DENSIDADE E O MÓDULO DE RUPTURA

A figura 60 apresenta a relação entre a densidade média em função do tipo de aditivo e a tensão média de ruptura. Observa-se, nesta figura, que o coeficiente de correlação é bastante elevado, mostrando assim que quanto mais compactado for o corpo de prova maior a resistência à flexão.

Como a densidade é inversamente proporcional ao fator água/cimento devido ao fato de que quanto mais água maior o número de vazios e, conseqüentemente, menor a resistência, pode se justificar dessa forma a elevada interação entre a matriz de cimento e as partículas de madeira, pois quanto menor a partícula, menor é o número de vazios e conseqüentemente maior a resistência.

A mesma relação para o módulo de elasticidade fornece valores de correlação baixos, conforme pode se observar na figura 61.

Observa-se na figura 62 a relação entre as granulometrias e os aditivos onde a combinação de aditivos a base de cloreto com a granulometria mais grossa levou aos melhores resultados. Essa figura mostra uma tendência no aumento da resistência à flexão com o aumento da granulometria.

Por sua vez o gráfico que relaciona o módulo de elasticidade à flexão com os aditivos e granulometrias, está apresentado na figura 63.

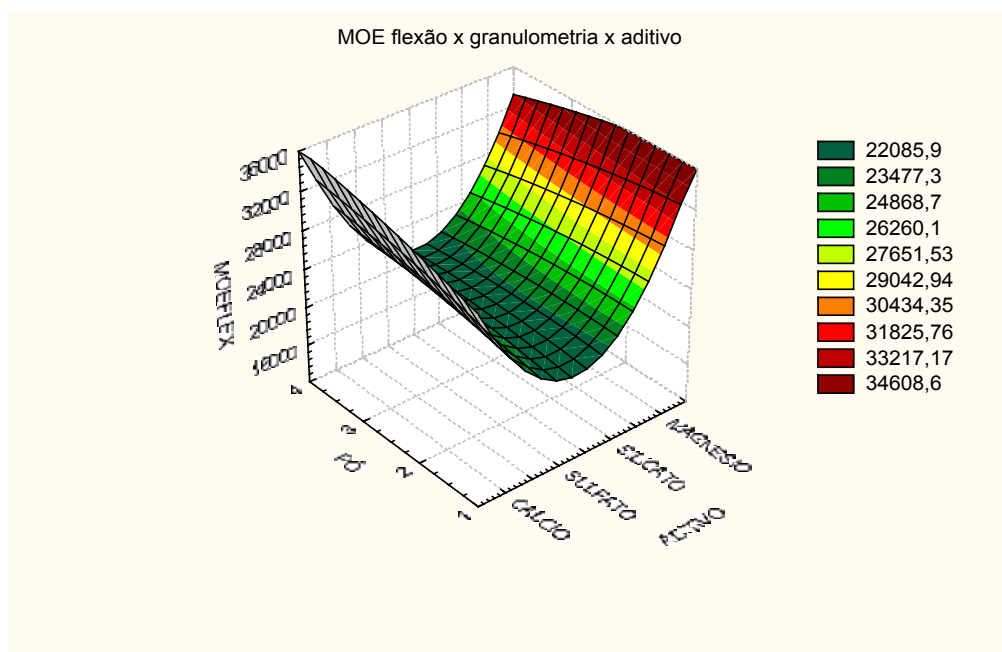


FIGURA 63 – RELAÇÃO: MOE X GRANULOMETRIA X ADITIVO NA FLEXÃO.

Novamente o aditivo à base de cloreto de magnésio tem comportamento diferente quando se compara aos ensaios à compressão. No entanto permanece a combinação maior granulometria e cloreto de cálcio como o melhor valor apresentado.

4.4.6 Ligação interna

Um dos parâmetros que pode servir para comparação nos valores da ligação interna é o conforme adotado no sistema BISON® cujo valor é 4,0 kg/cm².

A - Análise em função do tipo de aditivo

Os resultados obtidos para o ensaio de ligação interna, considerando os aditivos em função da variação granulométrica, estão apresentados na tabela 38.

TABELA 38 – EFEITO DOS ADITIVOS SOBRE A LIGAÇÃO INTERNA (Kgf/cm²)

ADITIVO	LIGAÇÃO INTERNA							
	1	CV(%)	2	CV(%)	3	CV(%)	4	CV (%)
CaCl ₂	3,15 a	37,12	6,23 a	25,26	6,55 a	32,81	5,66 a	24,34
MgCl ₂	3,31 a	28,57	5,60 a	38,46	6,37 a	30,37	7,66 b	33,37
Al ₂ SO ₄	3,05 ab	31,05	3,21 b	28,23	3,05 b	31,05	4,03 c	35,82
Na ₂ SiO ₄	2,29 b	48,47	2,82 b	53,61	1,10 c	40,73	4,14 c	24,47

Pode-se observar pela tabela 38 que os aditivos a base de cloro forneceram os maiores valores, a exemplo do que ocorreu quando se analisou outros parâmetros. Ainda, considerando o valor mínimo de 4,0 kg/cm², esses aditivos foram aqueles em que, independente da granulometria forneceram valores superiores a esse mínimo.

O coeficiente de variação foi mais elevado para o silicato de sódio que, por sua vez, não forneceu valores superiores ao mínimo indicado, mostrando que sua influência na interação matriz de cimento partícula de madeira é mínima para a dosagem adotada.

A análise estatística comprova o fato indicando que existe diferença significativa entre o silicato e os demais aditivos, sendo o silicato o responsável pelos menores valores. Por sua vez, a combinação dos aditivos a base de cloro com as demais granulometrias (exceto a mais fina) forneceu os melhores resultados, sendo significativamente diferente dos demais aditivos.

Os valores limites para as médias encontradas podem ser observados na figura 64.

Valores médios para ligação interna com intervalo de 95%

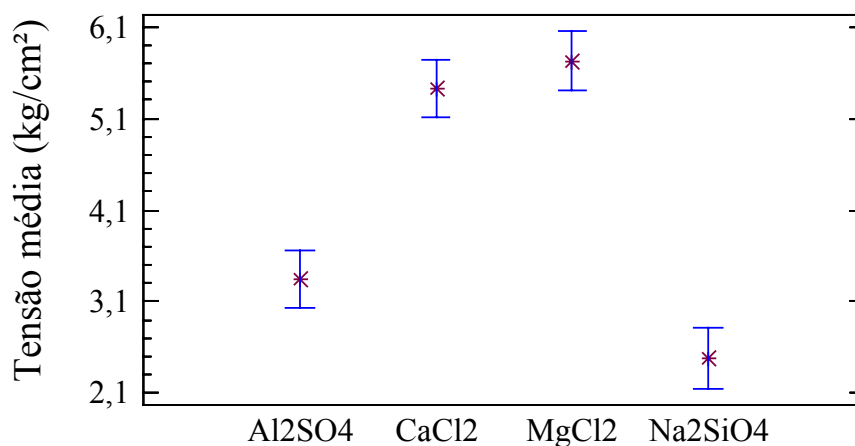


FIGURA 64 – VALORES MÉDIOS DA LIGAÇÃO INTERNA EM FUNÇÃO DOS ADITIVOS

Observa-se pela figura 64 que o aditivo à base de silicato de sódio, bem como o de sulfato de alumínio apresentam médias baixas e os valores superiores são menores que os limites inferiores dos aditivos à base de cloro.

B - Análise da ligação interna em função da granulometria

A tabela 39 mostra os resultados obtidos para a ligação interna considerando a granulometria em função do tipo de aditivo utilizado.

TABELA 39 – EFEITO DA GRANULOMETRIA SOBRE A LIGAÇÃO INTERNA.

PÓ DE MADEIRA	LIGAÇÃO INTERNA							
	CaCl ₂	CV(%)	MgCl ₂	CV(%)	Al ₂ SO ₄	CV(%)	Na ₂ SiO ₄	CV (%)
1	3,15 a	37,12	3,31 a	28,57	3,05 a	31,05	2,29 a	48,47
2	6,23 b	25,26	5,60 b	38,46	3,21 a	28,23	2,82 a	53,61
3	6,55 b	32,81	6,37Bc	30,37	3,05 a	31,05	1,10 b	40,73
4	5,66 b	24,34	7,66 c	33,37	4,03 b	35,82	4,14 c	24,47

Observa-se pela tabela 39 que apenas o pó mais fino não obteve os resultados acima do mínimo indicado como comparação, ou seja, o valor de 4,0 kg/cm².

Assim como ocorreu com os valores obtidos nos ensaios à compressão e à flexão, aqui também o pó mais fino obteve os piores resultados. Pode-se justificar esse resultado pelo fato de que granulometria mais fina reduz a trabalhabilidade, gerando corpos mais heterogêneos e por isso com valores menores para a ligação interna.

A análise estatística mostra que os valores diferem significativamente entre si. Ao se efetuar o teste de Tukey, verifica-se que apenas o pó mais fino difere de todos as demais por ter o menor valor. No extremo oposto, o pó mais grosso difere significativamente, mas por ter o maior valor. Na figura 65 a seguir pode observar-se o intervalo para as médias, com 95% de nível de significância.

Valores médios para ligação interna com intervalo de 95%

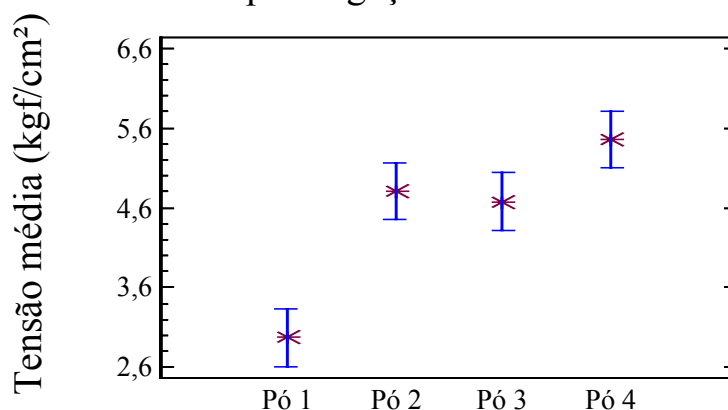


FIGURA 65 – VALORES MÉDIOS DA LIGAÇÃO INTERNA EM FUNÇÃO DA GRANULOMETRIA

Observa-se pela figura 65 que o pó mais fino é o que forneceu os menores valores e o extremo oposto, ou seja, o pó mais grosso forneceu os maiores valores. Pode-se justificar esse fato, pois o pó mais grosso é o que apresenta melhor trabalhabilidade na mistura e melhor adesão com a cola utilizada para o ensaio.

Observa-se na figura 65 que os aditivos à base de cloro forneceram os maiores valores e que o pó mais grosso teve um melhor comportamento, embora não para todos os aditivos. A figura 66 apresenta o resultado graficamente.

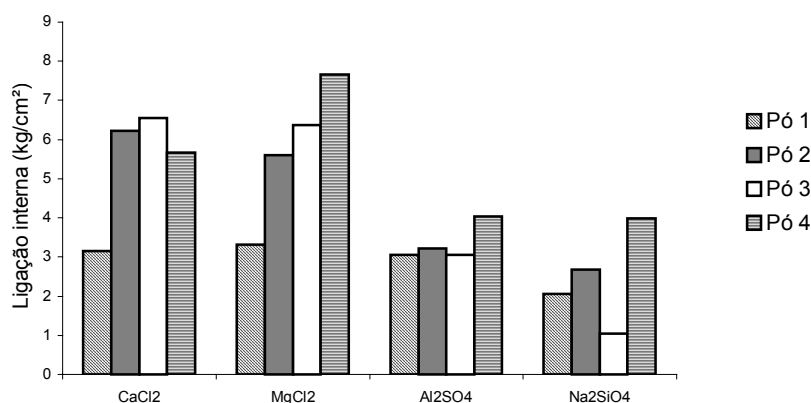


FIGURA 66 – LIGAÇÃO INTERNA PARA ADITIVOS EM FUNÇÃO DA GRANULOMETRIA

A figura 66 permite visualizar a eficiência dos aditivos à base de cloro bem como o efeito da granulometria, no qual o pó mais grosso obteve sempre resultados significativos.

Para o sulfato de alumínio o pó que se destacou foi o mais grosso e pelos maiores valores. As demais granulometrias não apresentaram diferença significativa, ocorrendo o mesmo comportamento para o silicato de sódio.

C - Análise gráfica da ligação interna

A análise do comportamento da ligação interna em função da variação do tipo de aditivo e granulometria, simultaneamente, pode ser observada pela figura 67.

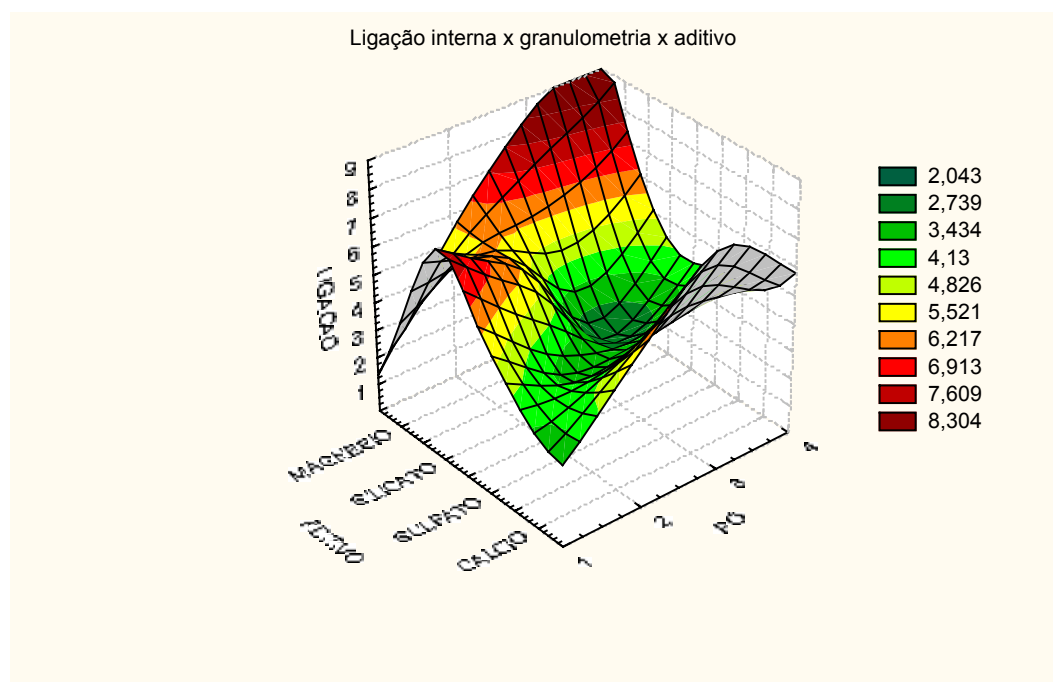


FIGURA 67 – LIGAÇÃO INTERNA EM FUNÇÃO DA GRANULOIMETRIA E ADITIVOS

Na figura 67 observa-se que as granulometrias mais grossas tiveram um bom comportamento, ultrapassando o limite mínimo indicado pela norma. Verifica-se também que o fator granulometria foi tão importante quanto o fator aditivo, diferentemente do que ocorre em outras propriedades.

4.4.7 Mistura de aditivos

A tabela 40 mostra os resultados para as diversas variáveis que caracterizam as propriedades dos painéis. Nessa mesma tabela estão apresentados os valores para a granulometria intermediária.

TABELA 40 –VALORES MÉDIOS PARA MISTURA DE ADITIVOS E CLORETO DE CÁLCIO.

PROPRIEDADES	ABSORÇÃO 24HS (%)	INCHAMENTO (%)	COMPRESSÃO (Kgf/cm ²)	FLEXÃO (Kgf/cm ²)	LIGAÇÃO INTERNA (Kgf/cm ²)
Média da mistura	6,17 a	0,9 a	194,50 a	66,25 a	3,45 a
CV (%)	24,60	22,83	11,10	20,53	25,12
Média do CaCl ₂	4,99 a	0,9 a	166,50 a	53,70 a	6,55 b
CV (%)	19,10	15,36	17,66	14,62	32,81

Com referência à absorção e inchamento para o período de 24 horas a análise estatística mostra que não houve diferença significativa entre os valores. Pode-se inferir daí que a forma de atuação dos aditivos tem influência na absorção de água.

Tanto a compressão quanto a flexão tem uma melhora substancial quando se utiliza ambos os aditivos mostrando assim a influência dos mesmos na interação entre a madeira e o cimento. Justifica-se esse resultado pelo fato de que tanto o sulfato quanto o silicato atuam também como aceleradores de pega e a soma de ambos contribuiu para essa melhora.

Finalmente, no que se refere à ligação interna, observa-se que não houve melhora significativa.

Outros procedimentos costumam ser adotados em outros trabalhos, como por exemplo a imersão total das partículas de madeira no silicato de sódio para depois, retirar-se o excesso desse aditivo para aí sim iniciar o procedimento normal da mistura do compósito. Esse procedimento altera o resultado uma vez que teores

acima de 13% de silicato de sódio em relação a massa de cimento, atuam como aceleradores na pega do cimento, influenciando no resultado final.

4.4.8 Comportamento da variação da relação madeira/cimento

Os valores das propriedades dos painéis obtidos com o teor de 25% de pó de madeira em relação à massa de cimento foram iguais ou superiores aos encontrados em outros trabalhos. No entanto dois aspectos devem ser considerados:

1. O teor de 25% de madeira em relação à massa de cimento leva à painéis com elevada densidade, dificultando seu manuseio e conseqüentemente elevando o custo de sua utilização. O aumento do teor de madeira reduz a densidade do painel.
2. Dentre os componentes do compósito o cimento tem o maior custo e também gera uma elevada carga de poluição.

Dessa forma, buscando minimizar os fatores negativos, adota-se nesse experimento o teor de 36% de pó de madeira, comparando assim com outros trabalhos sendo em alguns casos superior aos teores adotados industrialmente.

O mesmo tratamento feito no item anterior será adotado aqui, ou seja, para esse ensaio utiliza-se o aditivo que obteve os melhores resultados em outros ensaios, no presente caso o cloreto de cálcio. A granulometria adotada foi intermediária para permitir a comparação com o uso de dois aditivos simultaneamente. A tabela 39 apresenta os resultados para os diversos parâmetros, obtidos com esse teor.

TABELA 41 – VALORES MÉDIOS PARA O PAINEL COM 25% E 36% DE PÓ DE MADEIRA.

PROPRIEDADES	ABSORÇÃO 24hs (%)	INCHAMENTO (%)	COMPRESSÃO (kgf/cm ²)	FLEXÃO (Kgf/cm ²)	LIGAÇÃO INTERNA (Kgf/cm ²)
Média teor 36%	4,48 a	0,90 a	183,8 a	74,0 a	5,74 a
CV (%)	23,39	66,55	21,81	17,85	35,26
Média teor 25%	4,99 a	0,90 a	166,5 a	53,7 a	6,55 a
CV (%)	19,10	15,36	17,66	14,62	32,81
Media da mistura	6,17 a	0,70 a	194,5 a	66,2 a	3,45 b
CV (%)	24,60	22,83	11,10	20,53	25,12

Analisando a tabela 41 observa-se que os parâmetros de absorção e inchamento possuem pequena variação, indicando que para esse parâmetro a

variação do teor ou a utilização da mistura de aditivos não exerceram influência significativa.

Os valores para a compressão ficaram um pouco reduzidos, justificado pelo fato de que a redução da quantidade de cimento leva naturalmente a uma redução da resistência, pois é a matriz ligante.

Já os valores referentes à flexão tiveram um pequeno aumento justificado pelo aumento na quantidade de fibras que atua como uma espécie de armadura nesse compósito resistindo mais à tração.

A ligação interna teve valores muito próximos do teor de 25 % mostrando que a interação cimento madeira é responsável por esse comportamento.

Assim demonstra-se que a granulometria das partículas tem influência menor que a dos aditivos e do tipo de aglomerante utilizado. A espécie da madeira também é um importante fator e a espécie utilizada nesse trabalho é compatível com o cimento.

A análise estatística para a ligação interna mostra que não há diferença significativa quando se altera o teor de pó de madeira, havendo diferença significativa quando se altera ou a granulometria ou o aditivo ou ainda, ambos. Já para a flexão há diferença significativa quando se utiliza o teor de 25% ou teor de 36%. O primeiro fornece melhores resultados. Por sua vez, a análise da variância para a compressão mostra que não existe diferença significativa entre os teores de 25% e 36%.

4.4.9 Resultados do tratamento em câmara climatizada

A tabela 42 apresenta os resultados para os diversos parâmetros obtidos após a utilização da câmara climática. O aditivo utilizado foi o cloreto de magnésio.

TABELA 42 –MÉDIAS REFERENTES PAINÉIS CURADOS EM CÂMARA CLIMATIZADA.

PROPRIEDADES	ABSORÇÃO 24hs (%)	INCHAMENTO 24 hs (%)	COMPRESSÃO* (kgf/cm ²)	FLEXÃO* (Kgf/cm ²)	LIGAÇÃO INTERNA (Kgf/cm ²)
Média câmara 7 dias	5,77 a	0,30 a	93,80 a	40,85 a	3,81 a
CV (%)	33,01	48,97	19,31	13,93	40,30
Média teor 25%	3,65 a	0,70 a	166,50 b	53,70 b	3,11 a
CV (%)	31,19	51,93	23,97	13,82	29,94

* Módulo de ruptura

Analisando a tabela 41, verificou-se que não houve diferença estatística significativa para a absorção em 24 horas para o painel tratado em câmara climatizada. Pode-se justificar esses resultados considerando que os ensaios para o painel com tratamento na câmara foram feitos com 7 dias de idade e sendo o cimento de alta resistência inicial, há pouca diferença na cura para períodos maiores que esse. Dessa forma pode-se inferir que a maturação do painel, feito com pó de madeira, sob o efeito da climatização da Câmara foi suficiente para compensar o efeito da maturação em 14 dias, para essa propriedade.

Os valores obtidos para compressão e para a flexão são menores que os obtidos para o ensaio normal, ou seja, com 14 dias. Isso mostra que somente a cura a vapor não foi suficiente para melhorar a resistência e que o período de cura é importante.

No entanto a ligação interna teve comportamento distinto, onde a análise da variância revela que não há diferença significativa entre os valores com o nível de confiança de 95%. Esse fato mostra que há, mesmo com esse tratamento, grande variabilidade interna entre seus valores, pois a relação variação entre grupos sobre a variação interna não foi suficiente para indicar a diferença.

A - O comportamento do módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade tem comportamento diverso dos outros parâmetros analisados, pois relaciona a tensão com a deformação e considerando o tratamento feito à vapor, onde as condições de umidade são diversas é de se esperar essa ocorrência. A tabela 43 mostra os valores médios do módulo de elasticidade para cada experimento.

TABELA 43 – VALORES MÉDIOS REFERENTES AO MÓDULO DE ELASTICIDADE

PROPRIEDADES	COMPRESSÃO (MPa)	FLEXÃO (Kgf/cm ²)
Média teor 36 %	279,9 ab	30,10 ab
CV(%)	23,52	31,98
Média teor 25%	316,6 a	25,35 a
CV (%)	21,69	16,79
Média da mistura	324,0 a	32,61 b
CV (%)	19,47	16,02
Média câmara	271,0 b	23,35 a
CV (%)	14,01	14,09

Para a compressão, observa-se que o módulo de elasticidade é maior para o teor de 36% de pó de madeira e menor para a cura à vapor, mostrando aqui que não somente o tempo de cura mas o teor de pó de madeira teve influência no resultado. Observa-se, no entanto, que a diferença é pequena quando comparado com a mesma mistura sem a cura a vapor, e com período de cura diferente. As mesmas observações cabem para a flexão. O detalhe é que o coeficiente de variação foi menor para o tratamento a vapor mostrando que esse tratamento permitiu uma maior uniformidade entre os painéis.

A análise da variância confirma as observações acima mostrando que tanto para a compressão quanto para a flexão não há diferença significativa entre os valores considerando as chapas com tratamento à vapor e as chapas com teor de 25% de pó de madeira, mas com cura de 14 dias. Dessa forma, para esse teor é vantajoso utilizar-se da cura a vapor, pois reduz o tempo de cura pela metade. No entanto, para esse parâmetro o teor de 36% revelou-se muito vantajoso, pois além de aumentar o teor de madeira reduzindo os custos, melhora suas propriedades, conforme visto em tabelas anteriores.

4.4.10 Análise econômica dos painéis

A viabilidade de um novo produto ou compósito depende não só das características técnicas, mas também dos aspectos econômicos.

Alguns autores apresentam os custos globais incluindo a implantação da indústria para chegar a um custo médio do painel. Assim, VENTA (1994), apresenta o custo para o painel de cimento e partículas de madeira como sendo de US\$ 238,00 MSF (milhares de pés quadrados). Transformando esse dado no sistema internacional de unidades obtém-se o custo de US\$ 2,60 por m² ou ainda o equivalente a US\$ 260,00/m³, já que a espessura desse painel é de 1 cm.

Tomando o MDF como comparativo, de acordo com estudo de VALENÇA et alli (2000), o custo de produção por metro cúbico é de US\$ 148,00 e o preço médio em reais para o mercado interno no mesmo ano como R\$ 395,00 para chapas cruas. Esse valor é equivalente, em dólar da época, a US\$ 190,00 por m³.

Os custos unitários de cada um dos componentes do compósito estão apresentados na tabela 44, onde deve-se ressaltar que os aditivos foram adquiridos em pequena quantidade e que por isso seus valores estão superestimados. Para o cimento ocorre o mesmo fato, ou seja, o preço apresentado é aquele da aquisição no

varejo, no ponto final de venda. Em geral, os valores para quantidades maiores são mais baixos, devido a economia de escala.

TABELA 44 – CUSTOS DOS COMPONENTES DO COMPÓSITO POR METRO CÚBICO

MATERIAL	CUSTO UNITÁRIO (R\$)	QUANTIDADE POR m ³	TOTAL DO INSUMO (R\$)	TOTAL POR ADITIVO
Cimento CP V ARI RS	0,25/kg	1100 Kg	275,00	
Pó de madeira (média)	0,55/kg	275 kg	154,70	
Aditivo CaCl ₂	1,90/kg	44 kg	83,60	513,30
Aditivo MgCl ₂	3,20 /kg	44 kg	140,80	570,50
Aditivo Al ₂ SO ₄	0,75/kg	44 kg	33,00	462,70
Aditivo Na ₅ SiO ₃	1,20/kg	44 kg	52,80	482,50

Não foi considerado na tabela 44 do custo de mão de obra, pois esta depende do tipo de equipamento e, por sua vez, o uso da betoneira, (feito em laboratório) em escala industrial é inviável pela baixa produtividade.

Observa-se pela tabela acima que o aditivo cloreto de magnésio é o de maior custo e o de cloreto de cálcio é o segundo maior valor. Apesar de seus valores mais elevados foram os que forneceram os melhores resultados nos diversos ensaios. No entanto cabe ressaltar que a diferença é de apenas 12% entre os aditivos à base de cloro.

O maior custo do compósito, por m³, ficou para o cloreto de magnésio e o menor custo ficou para o sulfato de alumínio. O valor médio, em dólar, equivale a US\$ 169,00/m³ pouco superior ao custo de fabricação do MDF (medium density fiberboard) no entanto, os custos, ora calculados, referem-se a moldagem de laboratório e não industrial como o apresentado para outros tipos de painéis.

Por outro lado é possível comparar o custo do compósito em função da granulometria e do tipo de aditivo, já que os valores são distintos. Assim sendo a tabela 45 mostra o resultado dessa comparação.

TABELA 45 - CUSTOS DOS COMPÓSITOS EM REAIS POR METRO CÚBICO

CUSTO (R\$) EM FUNÇÃO DA GRANULOMETRIA				
ADITIVO	PÓ 1	PÓ 2	PÓ 3	PÓ 4
Aditivo CaCl_2	592,35	496,10	509,85	454,85
Aditivo MgCl_2	649,55	553,30	567,05	512,05
Aditivo Al_2SO_4	541,75	445,50	459,25	404,25
Aditivo Na_sSiO_3	561,55	465,30	479,05	424,05

Analisando sob o aspecto da granulometria, o pó mais fino foi o que apresentou os maiores custos, qualquer que seja o tipo de aditivo. A combinação de menor custo foi o sulfato de alumínio com o pó mais grosso e a combinação de maior custo foi o pó mais fino com o cloreto de magnésio.

Em termos de custo benefício, pode-se analisar relacionando-o com os resultados obtidos nos ensaios. Assim, a combinação aditivos à base de cloro e o pó mais grosso foram os melhores resultados tanto em resistência quanto em custo.

A - A análise gráfico dos custos

Da mesma forma como foi apresentado para as demais propriedades também pode-se visualizar a variação do custo em função do aditivo e da granulometria simultaneamente. Assim a figura 68 mostra essa relação.

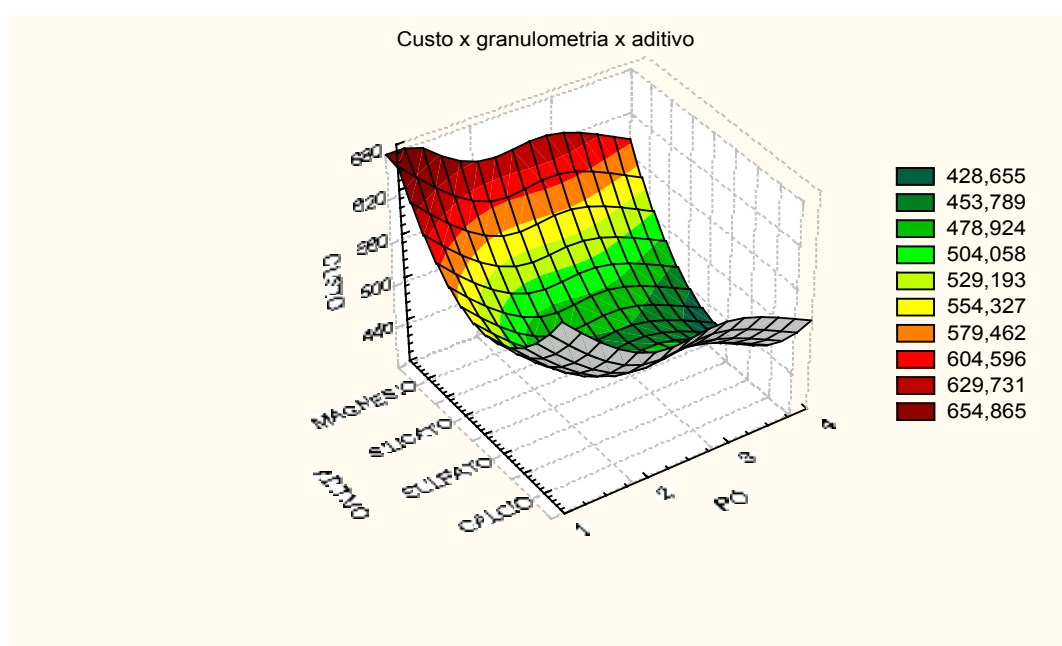


FIGURA 68 – RELAÇÃO CUSTOS X ADITIVOS X GRANULOMETRIAS

Observa-se pela figura 68 que os aditivos a base de silicato e de sulfato foram aqueles que forneceram os menores valores para o custo, sendo os mais econômicos. Por sua vez, o pó mais grosso foi a que forneceu os menores custos. Verifica-se neste caso que o fator granulometria pesa mais no custo do que o fator aditivo. E por isso, a combinação pó mais grosso e aditivo à base de sulfato ou silicato são as mais econômicas.

Os sais de cloro foram responsáveis pelo maior custo do compósito. Apesar disso, são os indicados, pois, nas diversas propriedades analisadas, são aqueles que forneceram os melhores resultados.

Conforme observa-se na figura 63, a combinação cloreto de cálcio e pó mais grosso foi a melhor opção pois apresentou pequena diferença percentual em relação à combinação pó mais grosso e silicato, sendo no entanto a combinação que forneceu os melhores resultados para as propriedades analisadas anteriormente.

Finalmente cabe citar que a diferença percentual dos custos é na média de 23%, ou seja, é suficientemente baixa para ser diluída entre outros fatores, como a instalação fabril, por exemplo.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Após a análise dos resultados conclui-se que:

- O efeito da matriz cimentícia teve maior preponderância quando comparado ao efeito granulometria;
- Até 20% de teor de pó de madeira na moldagem dos corpos de prova cilíndricos, o ensaio à compressão forneceu valores relativamente elevados. Apenas para os teores de 25% esses resultados foram baixos, pois a quantidade de água utilizada para garantir a moldagem, foi elevada e proporcionalmente reduz-se a quantidade de cimento.
- A mudança de aditivo não exerceu influência na densidade dos painéis. O mesmo ocorreu quando se alterou a granulometria, fato esse também demonstrado por outros autores;
- A granulometria não interferiu na absorção de água independente de qual tenha sido o aditivo utilizado;
- O valores do módulo de ruptura (MOR) e do módulo de elasticidade (MOE) foram maiores para os aditivos a base de cloreto e menores para aqueles a base de sulfato ou de silicato de sódio;
- Os valores obtidos para o módulo de ruptura tanto à compressão quanto à flexão, nos ensaios feitos com os painéis, foram elevados, quando comparado a trabalhos semelhantes;
- A menor granulometria forneceu os menores valores para o módulo de ruptura e o módulo de elasticidade no ensaio à compressão. Por sua vez a granulometria mais grossa forneceu os melhores resultados.
- No ensaio de ligação interna os aditivos a base de cloro obtiveram os melhores resultados, em função de sua forma de atuação no cimento;
- O aditivo silicato de sódio forneceu valores, para as propriedades analisadas, inferiores, comparados aos valores obtidos pelos aditivos a base de cloro. Da mesma forma a granulometria mais fina também forneceu valores médios inferiores às demais granulometrias;
- Os melhores valores, no ensaio de ligação interna, foram obtidos para a combinação pó mais grosso e aditivo a base de cloro;

- A combinação de aditivos não forneceu valores significativamente maiores que os observados quando se utilizou somente um aditivo, porém a utilização do teor de 36% de pó de madeira mostrou-se viável;
- A cura em ambiente controlado, no período de sete dias, não forneceu resultados iguais ou superiores aos obtidos com a cura em ambiente normal com o período de quatorze dias.
- Os custos dos painéis mostraram-se viáveis para a combinação de aditivo e granulometria que forneceu os melhores resultados.

Diante dessas conclusões, recomenda-se:

- Determinar as fases ligantes desse compósito utilizando-se de técnicas como difratometria de raios X, permitindo identificar além da fase celulose, os demais componentes minerais do compósito.
- Analisar a distribuição das tensões buscando identificar seu comportamento, definindo um pré-dimensionamento em função das resistências finais desejadas.
- Analisar o efeito da combinação de aditivos, separando do efeito moldagem das chapas.
- Determinar o comportamento térmico e higroscópico desses painéis.
- Determinar dosagem do pó de madeira em função da granulometria.
- Avaliar a resistência ao cisalhamento dos painéis.
- Determinar modelo matemático estudando a variação das diversas propriedades em função da variação da quantidade dos insumos.

REFERÊNCIAS

ABDELRAZIG, B.E.I. et al. – **Effects of accelerating admixtures on cement hydration** p. 106-120 - Admixtures for Concrete: Improvement of Properties, Proceedings of the International Symposium held by RILEM, May 14-17, 1990, Barcelona, Spain; Ed. by E. Vazquez; Chapman and Hall, p. London, 1990;

AGOPYAN, V. et al. **Developments of vegetable fiber reinforced cementitious materials in San Paulo** p. 90-120 International conference of sustainable construction into the next millennium environmentally, friendly and innovative cement based materials - 2000 - João Pessoa - PB;

AHO, MATTI – **Ecocen – the route system for the manufacture of cement-bonded particleboard.** – p. 75-77 vol. 1 - 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - Washington - USA – 1994;

ALBERTO, M. M. et. al. – **Compatibility if some tropical hardwoods species with Portland cement using isothermal calorimetry** – Forest products journal – vol. 50, num. 9 pg. 83-88 – 2000 – USA;

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C 494-92- **Standard Specifications for Chemical Admixtures for Concrete.**- Vol. 04.02, pp. 254-262- 1992 – USA;

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D 1037 - **Standard methods of evaluating the properties of wood-based fiber and particle panel materials** .- Annual Book of ASTM Standard 1982 USA;

ANDRIOLO, F. R., **Construções de concreto:** manual de práticas para controle e execução, São Paulo, Pini, 1984;

AOKI, YUKIO – **The manufacture of heat hardening cement particleboard** – p. 35-45 vol. 2 - 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - Washington - USA – 1994;

AROLA, A. RODGER – **Chunkrete: an alternative to concrete** – p. 121-131 vol. 3 - 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - Washington - USA – 1994;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND.- ABCP **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland.** Boletim técnico – 106. São Paulo. 1997. 22p;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – **Cimento Portland Composto.** NBR 11578. 1990 . 5p;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, - **Agregados para concreto, especificações.** NBR 7211 . 9p,- 1983;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, - **Determinação da composição granulométrica dos agregados, modo de ensaio**. NBR 7217 . 3p,- 1982;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, **Cimento Portland de alta resistência inicial**, NBR 5733, Julho/1991, 5 páginas;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, **Peneiras para ensaio, especificação**. 1980. 5 p, NBR 5734, Julho/1991, 5 páginas;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, **Agregado - determinação da composição granulométrica, especificação**, NBR 7217, 1987, 5p;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, **Agregado em estado solto- determinação da massa unitária**; NBR 7251, 1982, 3p;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, **Cimento Portland – determinação da resistência à compressão**, NBR 7215, 1996, 8p;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, **Concreto: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**, NBR 5739, jul 1994, 4p;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**, NBR 5738, 1994, 9p;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11580: Cimento Portland: determinação da água da pasta de consistência normal**. Rio de Janeiro, 1991. 3 p;

ATALLA, H. RAJAI – **Celluloses** – USDA Forest Service and University of Wisconsin – p.529 – 595 - Madison, WI – USA – 1992;

BALDWIN, R. F. – **Plywood manufacturing practices** – 2a. ed. – Miller Freeman Publications, Inc. – 1981 - San Francisco – USA.;

BENTUR, ARNON e MINDESS, SIDNEY – **Fibre reinforced cementitious composites** – 1a. ed. – ed. Routledge – p. 378-407 – 1990 – USA.;

BERALDO A. L. et. al. – **Efeito de tratamentos físico-químicos sobre a resistência à compressão de compósitos de madeira cimento** – VI encontro brasileiro em madeira e em estruturas de madeira – vol. 4, pg. 263-271 – 1998 – Florianópolis – SC;

BERALDO ANTONIO. L. e AZZINI, ANIZIO. – **Efeito de modificações na resistência à compressão de compósitos bambú-cimento** – VI encontro brasileiro em madeira e em estruturas de madeira – vol. 4, pg. 263-271 – 1998 – Florianópolis;

BIRAULT, ALAIN - **Plant experience with wood cement particleboard in FRANCE** p. 80-82 vol. 1– 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - Washington - USA – 1994;

BLANKENHORN, P. P.. et al. – **Temperature and moisture effects on selected properties of wood fiber-cement composites** – Cement and concrete research, num. 29 – 1999 – pg. 737-741 Elsevier science Ltd – USA.;

BLANKENHORN, P. P.. et al. – **The use of eastern hardwoods in the United States for the production of cement bonded particleboard** – vol. 2 p, 28-31 - 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - Washington - USA – 1994;

BLEZARD, Robert G., **The history of calcareous cement**, Lea's Chemistry of Cement Concrete, 40^a edition – p.1-22 Ed. Peter C. Hewlett – USA – 2001;

BODIG, J. e JAYNE, B. A – **Mechanics of wood and wood composites** – Krieger publishing company – USA – 1993.;

BUCHANAM, A H. e LEVINE, S. B. – **Wood based building materials and atmospheric carbon emissions** – Environmental Science & Policy – 1999 – pg. 427-437 – USA;

CALISTER JR., WILLIAN D. – **Materials science and engineering – An Introduction** – fourth edition – p. 510-544 – 1997 – USA;

COATES, GLYN R. **Product application of wood-cement particleboards including applied finishes.** –p. 189-192 vol. 1– 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - Washington - USA – 1994;

DEWIT, JOHN - **Utilizing the wood wool cement building boards for low cost housing and some other application possibilities of the boards**–p. 27-31 vol. 3– 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - Washington - USA – 1994;

DEWIT, JOHN - **The Elten system**–p. 68-70 vol. 1– 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - Washington - USA – 1994;

DINWOODIE J. M e PAXTON, B. H. – **A technical assessment of cement bonded particleboard** – p. 115-124 vol. 1 - 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - Washington - USA – 1994;

DINWOODIE J. M e PAXTON, B. H. – **The long-term performance of cement bonded wood particleboard** – p. 45-54 vol. 2 - 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - Washington - USA – 1994;

EDMEADES, RODNEY M. e HEWLETT PETER C. -. **Cements Admixtures**, Lea's Chemistry of Cement Concrete, 40^a edition – p.471 - 501 Ed. Peter C. Hewlett – USA – 2001;

EUROPEAN STANDARD – **Wood-based panels – Determination characteristic values of mechanical properties and density**. – EN 1058 – CEN – julho 1995;

EUROPEAN STANDARD . – **Wood-based panels – Determination of modulus of elasticity in bending and bending strength**. – EN 310-1993 – CEN – fevereiro 1993;

FAN, M. et al. – **Dimensional instability of cement bonded particleboard behavior of cement paste and its contribution to the composite** – Wood and Fiber Science – n.31 vol. 3 – p. 306-315 – July – 1999 – USA;

FENGEL, W. A e WEGENER, G. – **Wood: chemistry, ultrastructure, reaction** – Walter de Gruyter, New York – 1984 – USA.

FRICK, EGBERT – **The Bison system for the production of wood cement particleboards** – p. 63-67 vol. 1 - 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - Washington - USA – 1994;

GEIMER L. ROBERT et al. – **Carbon dioxide application for rapid production of cement particleboard** – p. 31-41 vol. 3 - 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - Washington - USA – 1994;

GRANDI, LUIZ ALFREDO C. – **Placas pré-moldadas de argamassa de cimento e pó de serra** – Tese – Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Agrícola – 1995 Campinas – SP;

HACHMI, M. e CAMPBELL A G. - **Wood cement chemical relationship** - p. 78-87 vol. 4 - 4th Conference of inorganic-bonded wood and fiber composite materials - USA – 1995;

HERMAWAN, DEDE et alli – **Rapid production of high-strength cement-bonded particleboard using gaseous or supercritical carbon dioxide** - – The Japan Wood Research Society – p. 294-300– 2001 – Japan;

HOLDERNESS, STEPHEN - **Marketing and application opportunities for cement bonded particleboards: lessons from Great Britain and North America** – p. 129-132 vol. 2 - 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - Washington - USA – 1994;

IWAKIRI, Setsuo et al.– **Resíduos de serraria na produção de painéis de madeira aglomerada de Eucalipto** – scientia agrária – vol. 1 n.1-2 p.23-28 editora UFPR – 2000 - Curitiba – PR;

IWAKIRI, Setsuo. – **Painéis de madeira** – apostila - – ed. Fupef - UFPR – 1998 - Curitiba – PR;

JACKSON, PETER J. **Portland cement – classification and manufacture**, Lea's Chemistry of Cement Concrete, 40^a edition – p.25-88 Ed. Peter C. Hewlett – USA – 2001;

KARSTEN, LEMPTER e SATTLER, HEINZ – **Long-term performance of cement-bonded particleboard and fiberboard** – p. 125-132 vol. 1 - 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - Washington - USA – 1994;

KUROKI, YASUO et alli. – **Cement bonded board industry and market in Japan and new technology developments.**–p. 105 - 112 vol.4– 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - Washington – USA 1994;

KUROKI, YASUO, NAGATOMI, WAKATSU e YAMADA, JUNYA – **Manufacture of light-weight Cement bonded particleboard in Japan** –p.136 - 142 – vol. 4 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - Washington – USA 1994;

KURPIEL, E. e MOSLEMI, A. A. . – **Acceptance of mineral composites in North america.**–p. 124 - 126 vol. 4– 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - Washington – USA 1994;

LATORRACA, J. V. F. – **Eucalyptus spp. na produção de painéis de cimento-madeira** - Tese de doutorado - Engenharia Florestal - UFPR – Curitiba – PR – 2000;

LAWRENCE C. D. – **Physicochemical and mechanical properties of Portland cements**, Lea's Chemistry of Cement Concrete, p. 355 – 381 – 4^a edition – Ed. Peter C. Hewlett – USA – 2001;

LAWRENCE C. D. – **The constitution and Specification of Portland cements**, Lea's Chemistry of Cement Concrete, p. 131 – 175 – 4^a edition – Ed. Peter C. Hewlett – USA – 2001;

LEVINE, DAVID M. et al. – **Estatística: teoria e aplicações** – p. 400 – 415 – 1^a, ed. LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S/A – 2000 – Rio de Janeiro;

LIPINSKI, EDWARDS – **Potencial technologies for effectively bonding wood with inorganic binders** – p. 53-58 vol. 1 - 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - Washington - USA – 1994;

MACPHEE, DONALD E. e LACHOWSKI, ERIC E.. **Cement components and their phase relations**, Lea's Chemistry of Cement Concrete, 40^a edition – p.95-126 Ed. Peter C. Hewlett – USA – 2001;

MASSAZZA, FRANCO.. **Pozzolana and possolanic cements**, Lea's Chemistry of Cement Concrete, 40^a edition – p.471 - 501 Ed. Peter C. Hewlett – USA – 2001;

MATOSKI, A. ; IWAKIRI, S. . **Properties of wood fiber cement composite using wood recycled materials**. Inter American Conference on Non-Conventional Materials and Technologies in the Eco-Construction and Infra structure NOCMAT 2003, João Pessoa;

MATOSKI, A. ; IWAKIRI, S.; MARINHO, A. R M ; NAKAMURA, M. . **Análise de tensões em corpos de provas cilíndricos de compósito cimento-madeira utilizando materiais reciclados**. VI seminário de desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil, 2003, Ibracon - São Paulo;

MATOSKI, A. ;JUNGLES A. E. ; MENDES, N.- **Efeitos deletérios dos cloretos em reservatórios de concreto**. Dissertação – 1998 – UFSC – Florianópolis – SC; MEHTA, P. K. e MONTEIRO, J. M. – **Concreto – estrutura, propriedades e materiais** – p. 274 – 309 – Ed. Pini – 1994 – SP;

MOSLEMI A. A e MANGALA, P. – **The hidration behavior of kraft and CMP/RMP pulp and paper sludge-Portland cement mixtures**–p. 12-17 – vol. 4 – 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - Washington - USA – 1994;

MOSLEMI A. A. ; SOUZA, MARIO e GEIMER P. . – **Accelerated ageing of cement bonded particleboard**–p. 83-88 –vol. 4 - 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - Washington - USA – 1994;

MOSLEMI A. A.; GARCIA, J.F.; HOFSTRAND, A.D. Effect of various treatments and additives on wood-portland cement water systems. **Wood and Fiber science**, v. 15, n.2, p. 164-176, 1983, USA;

Movimax® - Industria Comercio e Representações Ltda – www.climatexforros.com.br - acessado em 30/ago/2004;

MYERS, RAYMOND H. e MONTGOMERY, DOUGLAS C. – **Response surface methodology** – p. 2-15- A Wiley-Interscience publication – 2nd. Ed. USA, 2002.

NETO, BENICIO DE BARROS et al. – **Planejamento e otimização de experimentos**. p. 61-75– Editora da Unicamp – Campinas – SP – 1995;

NEVILLE, A . M., **Propriedades do concreto**, tradução Salvador E. Giammusso, 2ª edição revisada atual, São Paulo, Pini, 1997;

ODLER, IVAN. **Hydration, setting and hardening of Portland cements**, Lea's Chemistry of Cement Concrete, 40ª edition – p.241 - 289 Ed. Peter C. Hewlett – USA – 2001;

PABLO A.; GEIMER ROBERT L. e WOOD JR., JAMES E. – **Accelerated pressing of low-density cement bonded board**. - p. 98-101 - 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - Washington - USA – 1994;

PASNER, LASZLO e KLEMARENSKI, ANDZREJ. – **New developments in wood bonding with magnesium oxyphosphate cement** – p. 26-30 vol. 1 - 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - Washington - USA – 1994;

RAMIREZ-CORETTI, C.A. ECKELMAN e R. W. WOLFE – **Inorganic-Bonded composite wood panel systems for low-cost housing: a Central American Perspective**. Forest Product Journal, N. 48 vol. 4 – p. 62-68. – 1998 – USA;

SAVASTANO Jr, H. et al. – **Brazilian waste fibers as reinforcement for cement-based composites** – Cement & concrete composites – 2000 – pg. 379-384 – Elsevier Science Ltd. USA;

SAVASTANO Jr. et al. – **Developing waste cellulose fibre reinforced composites with clinker free cement** – 3RD International conference of sustainable construction into the next millennium environmentally, friendly and innovative cement based materials - 2000 - pg. 278-292 - João Pessoa – PB;

SAVASTANO Jr. et al. - **Sisal mechanical pulps as reinforcement for cement-based materials** - International conference on non conventional materials and technologies – NOCMAT – 2002 p. 211-218 – Hanoi – VIETNAM;

SCANDIUZZI, L.; ANDRIOLO, F. R., **Concreto e seus materiais: propriedades e ensaios**, São Paulo, Pini, 1986;

SCBHUIYAN, Md. T. R. ; HIRAI, N. e SOBUE, N. – **Changes of crystallinity in wood cellulose by heat treatment under dried and moist conditions** – Journal Wood Science – p. 431-436 – The Japan Wood Research Society, 2000 – Japan;

SHIGEKURA, YUKO. et al. – **Properties of wood fiber-cement composite materials manufactured by an extruder** – p. 42-47 – vol 3. 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - Washington - USA – 1994;

SILVA, MARISTELA G. e SILVA VANESSA G. – **Painéis de vedação** – p. 7-32 – Bibliografia técnica para o desenvolvimento da construção em aço. Editado por Açominas S/A e Gerdau S/A – <http://www.acominas.com.br/perfis/> acesso em 15/11/2004;

SIMATUPANG, M. H. et al. – **Investigations on the influence of the addition of carbon dioxide on the production and properties of rapidly set wood-cement composites** – p. 187-197. Cement and concrete composites – 1995 – Great Britain – UK;

SIMATUPANG, M. H. et al. – **Technologies for rapid production of mineral bonded wood-composites boards** – p. 18-27 – vol 2. 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - Washington - USA – 1994;

SIMS, YAN e BROWN BEV. – **Concrete Aggregates**, Lea's Chemistry of Cement Concrete, p. 907-981 – 4ª edition – Ed. Peter C. Hewlett – USA – 2001;

SKAAR, C. – **Water in Wood** – Syracuse University Press – USA – 1972;

SOLÓRZANO, ARTURO G. R.. – **Experience of manufacturing wood-cement particleboard in Mexico** – p. 84-87. vol 1. 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - Washington - USA – 1994;

SOROUSHIAM P. et al. – **Development accelerated processing techniques for cement-bonded wood particleboard** – article in press, Elsevier - vol 25 – 2003 – UK;

SOROUSHIAM P. et alli – **Durability characteristics of wastepaper fiber cement composites** – p. 89-97 vol. 4 - 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - Washington - USA – 1994;

TOMASELLI, IVAN e TUOTO, MARCOS – **Oferta de pinus no Brasil** – Revista da Madeira p. 6-8 – edição especial – dezembro de 2002 – Curitiba – Brasil.

TSYPIN, J. – **Characteristics of production and application of cement bonded particleboard in the Soviet Union** – p. 55-57 vol. 2 - 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - USA – 1994;

VALENÇA, ANTONIO CARLOS V. et al. – Relatório **MDF – médium Density Fiberboard** – área de operações industriais 2 – produtos florestais – BNDES – 2000 – Brasil;

VENTA, GEORGE J. – **Gypsum fiberboard: a high performance specialty board** – p. 66-77 vol. 3 - 4th. International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference - Washington - USA – 1994;

WEI, YI MIN e BUNICHIRO, TOMITA – **Effects of five additive materials on mechanical and dimensional properties of wood cement-bonded boards** – The Japan Wood Research Society – p. 437-444 – 2000 – Japan;

WEI, YI MIN, ZHOU YIA GUANG e TOMITA, BUNICHIRO – **Study of hydration behavior of wood cement-based composite II: effect of chemical additives on the hydration characteristics and strengths of wood cement composites** – The Japan Wood Research Society – p. 444-451– 2000 – Japan;

WOLFE, RONALD W. e GKINOLLI, AGRON – **Durability and strength of cement-bonded wood particle composites made from construction waste** . Forest Product Journal, N. 49 vol. 2 – p. 24-31. – 1999 – USA;

YOUNGQUIST, J. A – **Wood Based composites and panel products – Wood Handbook -Wood as an engineering material** – Madison, WI – pg. 10.1 – 10-31 - 1999 – USA;

ZOULALIAN, ANDRÉ, MOUGUEL, ERIC e BERALDO, ANTONIO L. –
Dimensionally stable cement bonded Particleboard–p. 19-24 –vol. 4 4th.
International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference -
Washington - USA – 1994;

ANEXOS

Anexo III – Comparação de procedimentos

Teste de comparação múltipla de médias

Metod: 95,0 % Tukey			
	N	Média	Grupo homogêneo
Pó 4 procedimento 1	4	21,49	a
Pó 1 procedimento 2	4	22,15	a
Pó 1 procedimento 1	4	27,37	b
Pó 4 procedimento 2	4	28,32	b

Comparação		Diferença
Pó 1 proced1 - Pó 1 proced2		*5,2275
Pó 1 proced1 - Pó 4 proced1		*5,885
Pó 1 proced1 - Pó 4 proced2		-0,945
Pó 1 proced2 - Pó 4 proced1		0,6575
Pó 1 proced2 - Pó 4 proced2		*-6,1725
Pó 4 proced1 - Pó 4 proced2		*-6,83

* denota diferença estatística significativa

Anexo IV – Comparação da tensão em função da variação do fator a/c

Comparação Múltipla de Médias

Método: 95,0 % Tukey			
	N	Média	Grupo Homogêneo
pó 2	4	30,64	a
pó 1	4	31,23	a
pó 3	4	31,275	a
pó 4	4	31,6425	a

Comparação		Diferença
pó 1 - pó 2		0,59
pó 1 - pó 3		-0,045
pó 1 - pó 4		-0,4125
pó 2 - pó 3		-0,635
pó 2 - pó 4		-1,0025
pó 3 - pó 4		-0,3675

* denota diferença estatística significativa.

Anexo V – Comparação entre densidades dos corpos de prova cilíndricos

Comparação múltipla de médias

Metod: 95,0 % Tukey			
	N	Média	Grupo homogêneo
Pó 3	4	1,75	X
Pó 1	4	1,75	X
Pó 2	4	1,77	X
Pó 4	4	1,79	X
Contrast		Difference	+/- Limits
Pó 1 - Pó 2		-0,015	0,0791985
Pó 1 - Pó 3		0,0025	0,0791985
Pó 1 - Pó 4		-0,035	0,0791985
Pó 2 - Pó 3		0,0175	0,0791985
Pó 2 - Pó 4		-0,02	0,0791985
Pó 3 - Pó 4		-0,0375	0,0791985

* denota diferença estatística significativa.

Anexo VI – Comparação da trabalhabilidade

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey			
	N	Média	Grupo homogêneo
pó 4	4	262,188	X
pó 1	4	263,85	X
pó 3	4	277,275	X
pó 2	4	281,212	X
Comparação		Diferença	
pó 1 - pó 2		-17,3625	
pó 1 - pó 3		-13,425	
pó 1 - pó 4		1,6625	
pó 2 - pó 3		3,9375	
pó 2 - pó 4		19,025	
pó 3 - pó 4		15,0875	

* denot diferença estatística significativa.

Anexo VII – Comparação da tensão em função do teor de madeira

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0%	Tukey		
	N	Média	Grupo homogêneo
pó 4	4	262,188	X
pó 1	4	263,85	X
pó 3	4	277,275	X
pó 2	4	281,212	X

Comparação	Diferença
pó 1 - pó 2	-17,3625
pó 1 - pó 3	-13,425
pó 1 - pó 4	1,6625
pó 2 - pó 3	3,9375
pó 2 - pó 4	19,025
pó 3 - pó 4	15,0875

* denot diferença estatística significativa.

Anexo VIII – Análise estatística da regressão

RESUMO DOS RESULTADOS

<i>Estatística de regressão</i>	
R-Quadrado	0,922
Observações	22

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	0,317	0,317	234,828	0,000
Resíduo	20	0,027	0,001		
Total	21	0,344			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	1,450	0,015	96,782	0,000
tensão	0,011	0,001	15,324	0,000

Anexo IX – Comparação entre densidades dos painéis - cálcio

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0 % Tukey			
	N	Média	Grupo homogêneo
Pó 4	6	1,475	X
Pó 3	6	1,516	X
Pó 1	6	1,52	X
Pó 2	6	1,531	X

Comparação	Diferença
Pó 1 - Pó 2	-0,0116667
Pó 1 - Pó 3	0,00333333
Pó 1 - Pó 4	0,045
Pó 2 - Pó 3	0,015
Pó 2 - Pó 4	0,0566667
Pó 3 - Pó 4	0,0416667

* denota diferença estatística significativa

Anexo X – Comparação entre densidades dos painéis - magnésio

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0 % Tukey			
	N	Média	Grupo homogêneo
Pó 4	6	1,455	X
Pó 1	6	1,465	X
Pó 2	6	1,485	X
Pó 3	6	1,5	X

Comparação	Diferença
Pó 1 - Pó 2	-0,02
Pó 1 - Pó 3	-0,035
Pó 1 - Pó 4	0,01
Pó 2 - Pó 3	-0,015
Pó 2 - Pó 4	0,03
Pó 3 - Pó 4	0,045

* denota diferença estatística significativa.

Anexo XI – Comparação entre densidades dos painéis - sulfato

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey			
	N	Média	Grupo homogêneo
Pó 4	6	1,406	X
Pó 3	6	1,486	XX
Pó 1	6	1,493	XX
Pó 2	6	1,535	X
Comparação		Diferença	
Pó 1 - Pó 2			-0,0416667
Pó 1 - Pó 3			0,00666667
Pó 1 - Pó 4			0,0866667
Pó 2 - Pó 3			0,0483333
Pó 2 - Pó 4			*0,128333
Pó 3 - Pó 4			0,08

* denota diferença estatística significativa.

Anexo XII – Comparação entre densidades dos painéis - silicato

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey			
	N	Média	Grupo homogêneo
Pó 4	6	1,406	X
Pó 3	6	1,486	XX
Pó 1	6	1,493	XX
Pó 2	6	1,535	X
Comparação		Diferença	
Pó 1 - Pó 2			-0,0416667
Pó 1 - Pó 3			0,00666667
Pó 1 - Pó 4			0,0866667
Pó 2 - Pó 3			0,0483333
Pó 2 - Pó 4			*0,128333
Pó 3 - Pó 4			0,08

* denota diferença estatística significativa.

Anexo XIII – Comparação entre absorções – aditivo – 2 horas

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey			
	N	Média	Grupo homogêneo
sulfato	4	1,447	X
calcio	4	2,095	XX
magnesio	4	2,802	X
silicato	4	5,275	X

Comparação	Diferença
calcio - magnesio	-0,7075
calcio - silicato	*-3,18
calcio - sulfato	0,6475
magnesio - silicato	*-2,4725
magnesio - sulfato	*1,355
silicato - sulfato	*3,8275

* denota diferença estatística significativa

Anexo XIV – Comparação entre absorções – pó de madeira – 2 horas

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey			
	N	Média	Grupo homogêneo
Pó 4	4	2,497	X
Pó 2	4	2,525	X
Pó 3	4	3,125	X
Pó 1	4	3,472	X

Comparação	Diferença
Pó 1 - Pó 2	0,9475
Pó 1 - Pó 3	0,3475
Pó 1 - Pó 4	0,975
Pó 2 - Pó 3	-0,6
Pó 2 - Pó 4	0,0275
Pó 3 - Pó 4	0,6275

* denota diferença estatística significativa.

Anexo XV – Comparação entre absorções – aditivo – 24horas

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey			
	N	Média	Grupo homogêneo
sulfato	4	3,975	X
calcio	4	4,665	X
magnesio	4	5,592	X
silicato	4	8,022	X

Comparação	Diferença
calcio - magnesio	-0,9275
calcio - silicato	*-3,3575
calcio - sulfato	0,69
magnesio - silicato	*-2,43
magnesio - sulfato	1,6175
silicato - sulfato	*4,0475

* denota diferença estatística significativa.

Anexo XVI – Comparação entre absorções – pó de madeira – 24 horas

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey			
	N	Média	Grupo homogêneo
Pó 2	4	4,712	X
Pó 4	4	5,515	X
Pó 3	4	5,97	X
Pó 1	4	6,057	X

Comparação	Diferença
Pó 1 - Pó 2	1,345
Pó 1 - Pó 3	0,0875
Pó 1 - Pó 4	0,5425
Pó 2 - Pó 3	-1,2575
Pó 2 - Pó 4	-0,8025
Pó 3 - Pó 4	0,455

* denota diferença estatística significativa

Anexo XVII – Comparação entre inchamentos – cálcio – 2horas

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0 % Tukey			
	N	Média	Grupo homogêneo
Pó 1	6	0,6133	X
Pó 4	6	0,6833	X
Pó 2	6	1,4833	X
Pó 3	6	1,6166	X

Comparação	Diferença
Pó 1 - Pó 2	*-0,87
Pó 1 - Pó 3	*-1,00333
Pó 1 - Pó 4	-0,07
Pó 2 - Pó 3	-0,133333
Pó 2 - Pó 4	*0,8
Pó 3 - Pó 4	*0,933333

* denota diferença estatística significativa.

Anexo XVIII – Comparação entre inchamentos – magnésio – 2horas

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey			
	N	Média	Grupo homogêneo
Pó 3	6	0,516667	X
Pó 2	6	0,633333	XX
Pó 1	6	0,75	XX
Pó 4	6	1,13333	X

Comparação	Diferença
Pó 1 - Pó 2	0,116667
Pó 1 - Pó 3	0,233333
Pó 1 - Pó 4	-0,383333
Pó 2 - Pó 3	0,116667
Pó 2 - Pó 4	-0,5
Pó 3 - Pó 4	*-0,616667

* denota diferença estatística significativa

Anexo XIX – Comparação entre inchamentos – sulfato – 2horas

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupo homogêneo
Pó 1	6	0,25	X
Pó 4	6	0,3333	X
Pó 3	6	0,3666	X
Pó 2	6	0,3666	X

Comparação	Diferença
Pó 1 - Pó 2	-0,116667
Pó 1 - Pó 3	-0,116667
Pó 1 - Pó 4	-0,0833333
Pó 2 - Pó 3	0,0
Pó 2 - Pó 4	0,0333333
Pó 3 - Pó 4	0,0333333

* denota diferença estatística significativa.

Anexo XX – Comparação entre inchamentos – silicato – 2horas

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupo homogêneo
Pó 3	6	0,55	X
Pó 4	6	0,7333	X
Pó 2	6	0,7666	X
Pó 1	6	0,7666	X

Comparação	Diferença
Pó 1 - Pó 2	0,0
Pó 1 - Pó 3	0,216667
Pó 1 - Pó 4	0,0333333
Pó 2 - Pó 3	0,216667
Pó 2 - Pó 4	0,0333333
Pó 3 - Pó 4	-0,183333

* denota diferença estatística significativa.

Anexo XXI – Comparação entre inchamentos – Pó 1– 2horas

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupo homogêneo
SULFATO	6	0,333333	X
CALCIO	6	0,683333	XX
SILICATO	6	0,733333	XX
MAGNESIO	6	1,13333	X

Comparação	Diferença
CALCIO - MAGNESIO	-0,45
CALCIO - SILICATO	-0,05
CALCIO - SULFATO	0,35
MAGNESIO - SILICATO	0,4
MAGNESIO - SULFATO	*0,8
SILICATO - SULFATO	0,4

* denota diferença estatística significativa

Anexo XXII – Comparação entre inchamentos – Pó 2 – 2horas

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupo homogêneo
SULFATO	6	0,333333	X
CALCIO	6	0,683333	XX
SILICATO	6	0,733333	XX
MAGNESIO	6	1,13333	X

Comparação	Diferença
CALCIO - MAGNESIO	-0,45
CALCIO - SILICATO	-0,05
CALCIO - SULFATO	0,35
MAGNESIO - SILICATO	0,4
MAGNESIO - SULFATO	*0,8
SILICATO - SULFATO	0,4

* denota diferença estatística significativa

Anexo XXIII – Comparação entre inchamentos – Pó 3– 2horas

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupo homogêneo
SULFATO	6	0,333333	X
CALCIO	6	0,683333	XX
SILICATO	6	0,733333	XX
MAGNESIO	6	1,13333	X

Comparação	Diferença
CALCIO - MAGNESIO	-0,45
CALCIO - SILICATO	-0,05
CALCIO - SULFATO	0,35
MAGNESIO - SILICATO	0,4
MAGNESIO - SULFATO	*0,8
SILICATO - SULFATO	0,4

* denota diferença estatística significativa

Anexo XXIV – Comparação entre inchamentos – Pó 4 – 2horas

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupo homogêneo
SULFATO	6	0,333333	X
CALCIO	6	0,683333	XX
SILICATO	6	0,733333	XX
MAGNESIO	6	1,13333	X

Comparação	Diferença
CALCIO - MAGNESIO	-0,45
CALCIO - SILICATO	-0,05
CALCIO - SULFATO	0,35
MAGNESIO - SILICATO	0,4
MAGNESIO - SULFATO	*0,8
SILICATO - SULFATO	0,4

* denota diferença estatística significativa

Anexo XXV – Comparação entre inchamentos – Cálcio – 24 horas

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupo homogêneo
SULFATO	6	0,333333	X
CALCIO	6	0,683333	XX
SILICATO	6	0,733333	XX
MAGNESIO	6	1,13333	X

Comparação	Diferença
CALCIO - MAGNESIO	-0,45
CALCIO - SILICATO	-0,05
CALCIO - SULFATO	0,35
MAGNESIO - SILICATO	0,4
MAGNESIO - SULFATO	*0,8
SILICATO - SULFATO	0,4

* denota diferença estatística significativa

Anexo XXVI – Comparação entre inchamentos – Magnésio – 24 horas

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupo homogêneo
SULFATO	6	0,333333	X
CALCIO	6	0,683333	XX
SILICATO	6	0,733333	XX
MAGNESIO	6	1,13333	X

Comparação	Diferença
CALCIO - MAGNESIO	-0,45
CALCIO - SILICATO	-0,05
CALCIO - SULFATO	0,35
MAGNESIO - SILICATO	0,4
MAGNESIO - SULFATO	*0,8
SILICATO - SULFATO	0,4

* denota diferença estatística significativa

Anexo XXVII – Comparação entre inchamentos – sulfato – 24 horas

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupo homogêneo
SULFATO	6	0,333333	X
CALCIO	6	0,683333	XX
SILICATO	6	0,733333	XX
MAGNESIO	6	1,13333	X

Comparação	Diferença
CALCIO - MAGNESIO	-0,45
CALCIO - SILICATO	-0,05
CALCIO - SULFATO	0,35
MAGNESIO - SILICATO	0,4
MAGNESIO - SULFATO	*0,8
SILICATO - SULFATO	0,4

* denota diferença estatística significativa

Anexo XXVIII – Comparação entre inchamentos – silicato – 24 horas

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupo homogêneo
SULFATO	6	0,333333	X
CALCIO	6	0,683333	XX
SILICATO	6	0,733333	XX
MAGNESIO	6	1,13333	X

Comparação	Diferença
CALCIO - MAGNESIO	-0,45
CALCIO - SILICATO	-0,05
CALCIO - SULFATO	0,35
MAGNESIO - SILICATO	0,4
MAGNESIO - SULFATO	*0,8
SILICATO - SULFATO	0,4

* denota diferença estatística significativa

Anexo XXIX – Comparação entre inchamentos – Pó 1– 24 horas

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupo Homogêneo
SILICATO	6	0,0866667	X
SULFATO	6	0,12	X
CALCIO	6	0,1283333	X
MAGNESIO	6	0,1633333	X

Comparação	Diferença
CALCIO - MAGNESIO	-0,035
CALCIO - SILICATO	0,0416667
CALCIO - SULFATO	0,00833333
MAGNESIO - SILICATO	0,0766667
MAGNESIO - SULFATO	0,0433333
SILICATO - SULFATO	-0,0333333

* denota diferença estatística significativa.

Anexo XXX – Comparação entre inchamentos – Pó 2 – 24 horas

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupo Homogêneo
SILICATO	6	0,0866667	X
SULFATO	6	0,12	X
CALCIO	6	0,1283333	X
MAGNESIO	6	0,1633333	X

Comparação	Diferença
CALCIO - MAGNESIO	-0,035
CALCIO - SILICATO	0,0416667
CALCIO - SULFATO	0,00833333
MAGNESIO - SILICATO	0,0766667
MAGNESIO - SULFATO	0,0433333
SILICATO - SULFATO	-0,0333333

* denota diferença estatística significativa.

Anexo XXXI – Comparação entre inchamentos – Pó 3– 24 horas

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupo Homogêneo
SULFATO	6	0,55	X
MAGNESIO	6	1,01167	XX
SILICATO	6	1,32	XX
CALCIO	6	1,89	X

Comparação	Diferença
CALCIO - MAGNESIO	0,878333
CALCIO - SILICATO	0,57
CALCIO - SULFATO	*1,34
MAGNESIO - SILICATO	-0,308333
MAGNESIO - SULFATO	0,461667
SILICATO - SULFATO	0,77

* denota diferença estatística significativa.

Anexo XXXII – Comparação entre inchamentos – Pó 4 – 24 horas

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupo Homogêneo
SULFATO	6	0,55	X
MAGNESIO	6	1,01167	XX
SILICATO	6	1,32	XX
CALCIO	6	1,89	X

Comparação	Diferença
CALCIO - MAGNESIO	0,878333
CALCIO - SILICATO	0,57
CALCIO - SULFATO	*1,34
MAGNESIO - SILICATO	-0,308333
MAGNESIO - SULFATO	0,461667
SILICATO - SULFATO	0,77

* denota diferença estatística significativa.

Anexo XXXIII – Efeito dos aditivos sobre o módulo de ruptura – Pó 1

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey			
	N	Média	Grupos Homogêneos
silicato	9	113,9	X
sulfato	12	139,167	XX
magnesio	12	142,492	X
calcio	12	169,742	X

Comparação	Diferença
calcio - magnesio	*27,25
calcio - silicato	*55,8417
calcio - sulfato	*30,575
magnesio - silicato	*28,5917
magnesio - sulfato	3,325
silicato - sulfato	-25,2667

* denota diferença estatística significativa.

Anexo XXXIV – Efeito dos aditivos sobre o módulo de ruptura – Pó 2

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey			
	N	Média	Grupos Homogêneos
silicato	10	140,97	X
magnesio	12	169,475	X
sulfato	12	184,35	X
calcio	12	191,35	X

Comparação	Diferença
calcio - magnesio	21,875
calcio - silicato	*50,38
calcio - sulfato	7,0
magnesio - silicato	*28,505
magnesio - sulfato	-14,875
silicato - sulfato	*-43,38

* denota diferença estatística significativa

Anexo XXXV – Efeito dos aditivos sobre o módulo de ruptura – Pó 3

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0%	Tukey		
	N	Média	Grupos Homogeneos

silicato	11	117,87	X
sulfato	11	140,6	X
calcio	12	166,525	X
magnesio	12	208,775	X

Comparação		Diferença	

calcio - magnesio		*-42,25	
calcio - silicato		*48,655	
calcio - sulfato		*25,925	
magnesio - silicato		*90,905	
magnesio - sulfato		*68,175	
silicato - sulfato		-22,73	

* denota diferença estatística significativa.			

Anexo XXXVI – Efeito dos aditivos sobre o módulo de ruptura – Pó 4

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0%	Tukey		
	N	Média	Grupos Homogeneos

silicato	8	121,725	X
sulfato	12	129,117	X
calcio	12	197,475	X
magnesio	12	198,8	X

Comparação		Diferença	

calcio - magnesio		-1,325	
calcio - silicato		*75,75	
calcio - sulfato		*68,3583	
magnesio - silicato		*77,075	
magnesio - sulfato		*69,6833	
silicato - sulfato		-7,39167	

* denota diferença estatística significativa.			

Anexo XXXVII – Efeito dos aditivos sobre o módulo de elasticidade – Pó 1

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey			
	N	Média	Grupos Homogêneos
SULFATO	12	21044,7	X
MAGNESIO	12	21628,7	XX
CALCIO	12	30917,9	X
SILICATO	9	45637,5	X
Comparação		Diferença	
CALCIO - MAGNESIO		9289,19	
CALCIO - SILICATO		*-14719,7	
CALCIO - SULFATO		*9873,2	
MAGNESIO - SILICATO		*-24008,8	
MAGNESIO - SULFATO		584,008	
SILICATO - SULFATO		*24592,9	

* denota diferença estatística significativa.

Anexo XXXVIII – Efeito dos aditivos sobre o módulo de elasticidade – Pó 2

Comparação Multipla de Médias

Método: 95,0 %			
	N	Média	Grupo Homogêneo
MAGNESIO	12	32496,8	b
SULFATO	12	32981,6	b
CALCIO	12	35212,2	b
SILICATO	12	46591,6	a
Contraste		Diferença	
CALCIO - MAGNESIO		2715,33	
CALCIO - SILICATO		*-11379,4	
CALCIO - SULFATO		2230,53	
MAGNESIO - SILICATO		*-14094,8	
MAGNESIO - SULFATO		-484,792	
SILICATO - SULFATO		*13610,0	

* denota uma diferença estatística significativa.

Anexo XXXIX – Efeito dos aditivos sobre o módulo de elasticidade – Pó 3

Comparação Multipla de Médias

Método: 95,0 %

	N	Média	Grupo Homogêneo
SILICATO	8	17310,3	c
SULFATO	12	24723,2	b
CALCIO	12	31566,9	a
MAGNESIO	12	36433,9	a

Contraste	Diferença
CALCIO - MAGNESIO	-4866,97
CALCIO - SILICATO	*14256,6
CALCIO - SULFATO	*6843,7
MAGNESIO - SILICATO	*19123,6
MAGNESIO - SULFATO	*11710,7
SILICATO - SULFATO	*-7412,88

* denota uma diferença estatística significativa.

Anexo XL – Efeito dos aditivos sobre o módulo de elasticidade – Pó 4

Comparação Multipla de Médias

Método: 95,0 %

	N	Média	Grupo Homogêneo
SILICATO	8	20195,2	c
SULFATO	12	22891,8	c
MAGNESIO	12	28778,8	b
CALCIO	12	37992,8	a

Contraste	Diferença
CALCIO - MAGNESIO	*9214,04
CALCIO - SILICATO	*17797,6
CALCIO - SULFATO	*15100,9
MAGNESIO - SILICATO	*8583,54
MAGNESIO - SULFATO	*5886,9
SILICATO - SULFATO	-2696,64

* denota uma diferença estatística significante.

Anexo XLI – Efeito da granulometria sobre o módulo de ruptura – cálcio

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupos Homogeneos
Pó 3	12	166,525	X
Pó 1	12	169,742	X
Pó 2	12	191,35	X
Pó 4	12	197,475	X

Comparação	Diferença
Pó 1 - Pó 2	-21,6083
Pó 1 - Pó 3	3,21667
Pó 1 - Pó 4	-27,7333
Pó 2 - Pó 3	24,825
Pó 2 - Pó 4	-6,125
Pó 3 - Pó 4	-30,95

* denota diferença estatística significativa.

Anexo XLII – Efeito da granulometria sobre o módulo de ruptura – magnésio

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupos Homogeneos
Pó 1	12	142,492	X
Pó 2	12	169,475	XX
Pó 4	12	198,8	XX
Pó 3	12	208,775	X

Comparação	Diferença
Pó 1 - Pó 2	-26,9833
Pó 1 - Pó 3	*-66,2833
Pó 1 - Pó 4	*-56,3083
Pó 2 - Pó 3	*-39,3
Pó 2 - Pó 4	-29,325
Pó 3 - Pó 4	9,975

* denota diferença estatística significativa.

Anexo XLIII – Efeito da granulometria sobre o módulo de ruptura – sulfato

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupos homogêneos
Pó 4	12	129,117	X
Pó 1	12	139,167	X
Pó 3	10	140,6	X
Pó 2	12	184,35	X

Comparação	Diferença
Pó 1 - Pó 2	*-45,1833
Pó 1 - Pó 3	-1,43333
Pó 1 - Pó 4	10,05
Pó 2 - Pó 3	*43,75
Pó 2 - Pó 4	*55,2333
Pó 3 - Pó 4	11,4833

* denota diferença estatística significativa.

Anexo XLIV – Efeito da granulometria sobre o módulo de ruptura – silicato

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupos Homogeneos
Pó 1	9	113,9	X
Pó 3	10	117,87	X
Pó 4	8	121,725	X
Pó 2	10	140,97	X

Comparação	Diferença
Pó 1 - Pó 2	-27,07
Pó 1 - Pó 3	-3,97
Pó 1 - Pó 4	-7,825
Pó 2 - Pó 3	23,1
Pó 2 - Pó 4	19,245
Pó 3 - Pó 4	-3,855

* denota diferença estatística significativa.

Anexo XLV – Efeito da granulometria sobre o módulo de elasticidade – cálcio

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey			
	N	Média	Grupos homogêneos
Pó 1	12	30917,9	X
Pó 3	12	31566,9	X
Pó 2	12	35212,2	X
Pó 4	12	37992,8	X

Comparação	Diferença
Pó 1 - Pó 2	-4294,29
Pó 1 - Pó 3	-649,025
Pó 1 - Pó 4	-7074,93
Pó 2 - Pó 3	3645,27
Pó 2 - Pó 4	-2780,64
Pó 3 - Pó 4	-6425,91

* denota diferença estatística significativa.

Anexo XLVI – Efeito da granulometria sobre o módulo de ruptura – magnésio

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey			
	N	Média	Grupos Homogeneos
Pó 1	12	21628,7	X
Pó 4	12	28778,8	XX
Pó 2	12	32496,8	XX
Pó 3	12	36433,9	X

Comparação	Diferença
Pó 1 - Pó 2	*-10868,2
Pó 1 - Pó 3	*-14805,2
Pó 1 - Pó 4	-7150,08
Pó 2 - Pó 3	-3937,03
Pó 2 - Pó 4	3718,08
Pó 3 - Pó 4	*7655,1

* denota diferença estatística significativa.

Anexo XLV – Efeito da granulometria sobre o módulo de elasticidade – sulfato

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupos homogêneos
Pó 1	12	21044,7	X
Pó 4	12	22891,8	X
Pó 3	10	26474,8	X
Pó 2	12	32981,6	X

Comparação	Diferença
Pó 1 - Pó 2	*-11937,0
Pó 1 - Pó 3	-5430,18
Pó 1 - Pó 4	-1847,19
Pó 2 - Pó 3	*6506,78
Pó 2 - Pó 4	*10089,8
Pó 3 - Pó 4	3582,99

* denota diferença estatística significativa.

Anexo XLVI – Efeito da granulometria sobre o módulo de ruptura – silicato

Comparação múltipla de médias

Methdo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupos Homogeneos
Pó 3	10	17041,2	X
Pó 1	9	19128,8	X
Pó 4	8	20195,2	X
Pó 2	10	49458,9	X

Comparação	Diferença
Pó 1 - Pó 2	*-30330,1
Pó 1 - Pó 3	2087,6
Pó 1 - Pó 4	-1066,39
Pó 2 - Pó 3	*32417,7
Pó 2 - Pó 4	*29263,7
Pó 3 - Pó 4	-3153,99

* denota diferença estatística significativa.

Anexo XLIX – Efeito dos aditivos sobre o mor na flexão estática – Pó 1

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0%	Tukey		
	N	Média	Grupos Homogeneos

magnesio	11	19,7727	X
silicato	9	36,6111	X
sulfato	11	42,2182	X
calcio	11	51,6091	X

Comparação	Diferença		

calcio - magnesio	*31,8364		
calcio - silicato	*14,998		
calcio - sulfato	*9,39091		
magnesio - silicato	*-16,8384		
magnesio - sulfato	*-22,4455		
silicato - sulfato	-5,60707		

* denota diferença estatística significativa.			

Anexo XL – Efeito dos aditivos sobre o mor na flexão estática – Pó 2

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0%	Tukey		
	N	Média	Grupos Homogeneos

silicato	11	46,8091	X
calcio	12	53,525	X
sulfato	12	62,2333	X
magnesio	12	66,9083	X

Comparação	Diferença		

calcio - magnesio	*-13,3833		
calcio - silicato	6,71591		
calcio - sulfato	*-8,70833		
magnesio - silicato	*20,0992		
magnesio - sulfato	4,675		
silicato - sulfato	*-15,4242		

* denota diferença estatística significativa.			

Anexo XLIX – Efeito dos aditivos sobre o mor na flexão estática – Pó 3

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey			
	N	Média	Grupos homogêneos
silicato	11	29,0	X
sulfato	12	50,86	X
magnesio	12	52,4	X
calcio	12	53,7	X
Comparação		Diferença	
calcio - magnesio		1,3	
calcio - silicato		*24,7	
calcio - sulfato		2,83333	
magnesio - silicato		*23,4	
magnesio - sulfato		1,53333	
silicato - sulfato		*-21,8667	

* denota diferença estatística significativa.

Anexo XL – Efeito dos aditivos sobre o mor na flexão estática – Pó 4

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey			
	N	Média	Grupos Homogeneos
magnesio	9	32,57	X
silicato	10	40,17	XX
sulfato	10	46,76	X
calcio	12	60,35	X
Comparação		Diferença	
calcio - magnesio		*27,7833	
calcio - silicato		*20,18	
calcio - sulfato		*13,59	
magnesio - silicato		-7,60333	
magnesio - sulfato		*-14,1933	
silicato - sulfato		-6,59	

* denota diferença estatística significativa.

Anexo LIII – Efeito dos aditivos sobre o moe na flexão estática – Pó 1

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey			
	N	Média	Grupos Homogeneos
silicato	9	19957,4	X
sulfato	12	21595,3	X
Calcio	12	24684,3	XX
magnesio	8	29959,1	X

Comparação	Diferença
Calcio - magnesio	-5274,75
Calcio - silicato	4726,86
Calcio - sulfato	3089,03
magnesio - silicato	*10001,6
magnesio - sulfato	*8363,79
silicato - sulfato	-1637,83

* denota diferença estatística significativa

Anexo LIV – Efeito dos aditivos sobre o moe na flexão estática – Pó 2

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey			
	N	Média	Grupos Homogeneos
SILICATO	11	23678,3	X
CALCIO	12	26092,3	X
SULFATO	12	32223,1	X
MAGNESIO	11	32244,0	X

Comparação	Diferença
CALCIO - MAGNESIO	*-6151,63
CALCIO - SILICATO	2414,0
CALCIO - SULFATO	*-6130,79
MAGNESIO - SILICATO	*8565,63
MAGNESIO - SULFATO	20,8394
SILICATO - SULFATO	*-8544,79

* denota diferença estatística significativa

Anexo LIII – Efeito dos aditivos sobre o moe na flexão estática – Pó 3

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0%	Tukey N	Média	Grupos Homogeneos
F204455	12	26717,6	X
F93003	8	29959,1	X
F204480	11	32244,0	X
F2042	11	32526,7	X

Comparação	Diferença
F2042 - F204455	5809,14
F2042 - F204480	282,764
F2042 - F93003	2567,67
F204455 - F204480	-5526,37
F204455 - F93003	-3241,46
F204480 - F93003	2284,91

* denota diferença estatística significativa.

Anexo LIV – Efeito dos aditivos sobre o moe na flexão estática – Pó 4

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0%	Tukey N	Média	Grupos Homogeneos
SILICATO	10	18246,6	X
SULFATO	12	22264,2	X
MAGNESIO	11	32526,7	X
CALCIO	12	32708,5	X

Comparação	Diferença
CALCIO - MAGNESIO	181,772
CALCIO - SILICATO	*14461,9
CALCIO - SULFATO	*10444,3
MAGNESIO - SILICATO	*14280,1
MAGNESIO - SULFATO	*10262,5
SILICATO - SULFATO	-4017,59

* denota diferença estatística significativa.

Anexo LVII – Efeito da granulometria sobre o mor na flexão estática – Cálcio

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupos Homogeneos
Pó 1	12	51,6667	X
Pó 2	12	53,525	X
Pó 3	12	53,7	X
Pó 4	12	60,35	X

Comparação	Diferença
Pó 1 - Pó 2	-1,85833
Pó 1 - Pó 3	-2,03333
Pó 1 - Pó 4	-8,68333
Pó 2 - Pó 3	-0,175
Pó 2 - Pó 4	-6,825
Pó 3 - Pó 4	-6,65

* denota diferença estatística significativa.

Anexo LVIII – Efeito da granulometria sobre o mor na flexão estática – Magnésio

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupos Homogeneos
Pó 1	8	17,8375	X
Pó 4	11	29,2545	X
Pó 3	12	52,4	X
Pó 2	11	67,5364	X

Comparação	Diferença
Pó 1 - Pó 2	*-49,6989
Pó 1 - Pó 3	*-34,5625
Pó 1 - Pó 4	*-11,417
Pó 2 - Pó 3	*15,1364
Pó 2 - Pó 4	*38,2818
Pó 3 - Pó 4	*23,1455

* denota diferença estatística significativa.

Anexo LVII – Efeito da granulometria sobre o mor na flexão estática – Sulfato

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupos Homogeneos
Pó 1	12	43,6	X
Pó 4	12	46,675	X
Pó 3	12	50,8667	X
Pó 2	12	62,2333	X

Comparação Diferença

Pó 1 - Pó 2	*-18,6333
Pó 1 - Pó 3	-7,26667
Pó 1 - Pó 4	-3,075
Pó 2 - Pó 3	*11,3667
Pó 2 - Pó 4	*15,5583
Pó 3 - Pó 4	4,19167

* denota diferença estatística significativa.

Anexo LVIII – Efeito da granulometria sobre o mor na flexão estática – Silicato

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupos Homogeneos
Pó 3	11	30,2545	X
Pó 1	9	36,6111	XX
Pó 4	10	40,17	XX
Pó 2	11	46,8091	X

Comparação Diferença

Pó 1 - Pó 2	-10,198
Pó 1 - Pó 3	6,35657
Pó 1 - Pó 4	-3,55889
Pó 2 - Pó 3	*16,5545
Pó 2 - Pó 4	6,63909
Pó 3 - Pó 4	-9,91545

* denota diferença estatística significativa.

Anexo LXI – Efeito da granulometria sobre o moe na flexão estática – Cálcio

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey			
	N	Média	Grupos Homogeneos
Pó 1	12	24684,3	X
Pó 3	12	25535,9	X
Pó 2	12	26092,3	XX
Pó 4	12	32708,5	X

Comparação	Diferença
Pó 1 - Pó 2	-1408,03
Pó 1 - Pó 3	-851,592
Pó 1 - Pó 4	*-8024,2
Pó 2 - Pó 3	556,442
Pó 2 - Pó 4	-6616,17
Pó 3 - Pó 4	*-7172,61

* denota diferença estatística significativa.

Anexo LXII – Efeito da granulometria sobre o moe na flexão estática – Magnésio

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey			
	N	Média	Grupos Homogeneos
Pó 3	12	26717,6	X
Pó 1	8	29959,1	X
Pó 2	11	32244,0	X
Pó 4	11	32526,7	X

Comparação	Diferença
Pó 1 - Pó 2	-2284,91
Pó 1 - Pó 3	3241,46
Pó 1 - Pó 4	-2567,67
Pó 2 - Pó 3	5526,37
Pó 2 - Pó 4	-282,764
Pó 3 - Pó 4	-5809,14

* denota diferença estatística significativa.

Anexo LXIII – Efeito da granulometria sobre o moe na flexão estática – Sulfato

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupos Homogeneos
Pó 1	12	21595,3	X
Pó 4	12	22264,2	X
Pó 3	12	24434,6	X
Pó 2	12	32223,1	X

Comparação	Diferença
Pó 1 - Pó 2	*-10627,9
Pó 1 - Pó 3	-2839,37
Pó 1 - Pó 4	-668,95
Pó 2 - Pó 3	*7788,49
Pó 2 - Pó 4	*9958,91
Pó 3 - Pó 4	2170,42

* denota diferença estatística significativa.

Anexo LXIV – Efeito da granulometria sobre o moe na flexão estática – Silicato

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupos Homogeneos
Pó 3	10	13238,0	X
Pó 4	10	18246,6	XX
Pó 1	9	19957,4	X
Pó 2	11	23678,3	X

Comparação	Diferença
Pó 1 - Pó 2	-3720,9
Pó 1 - Pó 3	*6719,49
Pó 1 - Pó 4	1710,8
Pó 2 - Pó 3	*10440,4
Pó 2 - Pó 4	5431,71
Pó 3 - Pó 4	-5008,69

* denota diferença estatística significativa.

Anexo LXV – Efeito dos aditivos sobre a ligação interna – Pó 1

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey			
	N	Média	Grupo Homogeneos
silicato	12	2,29417	X
sulfato	18	3,04722	XX
calcio	18	3,14611	X
magnesio	18	3,31222	X

Comparação	Diferença
calcio - magnesio	-0,166111
calcio - silicato	*0,851944
calcio - sulfato	0,0988889
magnesio - silicato	*1,01806
magnesio - sulfato	0,265
silicato - sulfato	-0,753056

* denota diferença estatística significativa.

Anexo LXVI – Efeito dos aditivos sobre a ligação interna – Pó 2

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey			
	N	Média	Grupos Homogeneos
SILICATO	17	2,81588	X
SULFATO	18	3,21278	X
MAGNESIO	18	5,60167	X
CALCIO	18	6,225	X

Comparação	Diferença
CALCIO - MAGNESIO	0,623333
CALCIO - SILICATO	*3,40912
CALCIO - SULFATO	*3,01222
MAGNESIO - SILICATO	*2,78578
MAGNESIO - SULFATO	*2,38889
SILICATO - SULFATO	-0,396895

* denota diferença estatística significativa.

Anexo LXV – Efeito dos aditivos sobre a ligação interna – Pó 3

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0%	Tukey N	Média	Grupos Homogeneos
silicato	12	1,10083	X
sulfato	18	3,04722	X
magnesio	18	6,37	X
Calcio	18	6,54944	X

Comparação	Diferença
Calcio - magnesio	0,179444
Calcio - silicato	*5,44861
Calcio - sulfato	*3,50222
magnesio - silicato	*5,26917
magnesio - sulfato	*3,32278
silicato - sulfato	*-1,94639

* denota diferença estatística significativa.

Anexo LXVI – Efeito dos aditivos sobre a ligação interna – Pó 4

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0%	Tukey N	Média	Grupos Homogeneos
SULFATO	18	4,03389	X
SILICATO	16	4,1375	X
CALCIO	18	5,65722	X
MAGNESIO	18	7,66389	X

Comparação	Diferença
CALCIO - MAGNESIO	*-2,00667
CALCIO - SILICATO	*1,51972
CALCIO - SULFATO	*1,62333
MAGNESIO - SILICATO	*3,52639
MAGNESIO - SULFATO	*3,63
SILICATO - SULFATO	0,103611

* denota diferença estatística significativa.

Anexo LXIX – Efeito dos aditivos sobre a ligação interna – Cálcio

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupos Homogeneos
Pó 1	18	3,14611	X
Pó 4	18	5,65722	X
Pó 2	18	6,225	X
Pó 3	18	6,54944	X

Comparação	Diferença
Pó 1 - Pó 2	*-3,07889
Pó 1 - Pó 3	*-3,40333
Pó 1 - Pó 4	*-2,51111
Pó 2 - Pó 3	-0,324444
Pó 2 - Pó 4	0,567778
Pó 3 - Pó 4	0,892222

* denota diferença estatística significativa.

Anexo LXX – Efeito dos aditivos sobre a ligação interna – Magnésio

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupos Homogeneos
Pó 1	18	3,31222	X
Pó 2	18	5,60167	X
Pó 3	18	6,37	XX
Pó 4	18	7,66389	X

Comparação	Diferença
Pó 1 - Pó 2	*-2,28944
Pó 1 - Pó 3	*-3,05778
Pó 1 - Pó 4	*-4,35167
Pó 2 - Pó 3	-0,768333
Pó 2 - Pó 4	*-2,06222
Pó 3 - Pó 4	-1,29389

* denota diferença estatística significativa

Anexo LXXI – Efeito dos aditivos sobre a ligação interna – Sulfato

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey			
	N	Média	Grupos Homogeneos
Pó 1	18	3,04722	X
Pó 3	18	3,04722	X
Pó 2	18	3,21278	XX
Pó 4	18	4,03389	X

Comparação	Diferença
Pó 1 - Pó 2	-0,165556
Pó 1 - Pó 3	0,0
Pó 1 - Pó 4	*-0,986667
Pó 2 - Pó 3	0,165556
Pó 2 - Pó 4	-0,821111
Pó 3 - Pó 4	*-0,986667

* denota diferença estatística significativa.

Anexo LXXII – Efeito dos aditivos sobre a ligação interna – Silicato

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey			
	N	Média	Grupos Homogeneos
Pó 3	12	1,10083	X
Pó 1	12	2,29417	XX
Pó 2	17	2,81588	X
Pó 4	16	4,1375	X

Comparação	Diferença
Pó 1 - Pó 2	-0,521716
Pó 1 - Pó 3	1,19333
Pó 1 - Pó 4	*-1,84333
Pó 2 - Pó 3	*1,71505
Pó 2 - Pó 4	*-1,32162
Pó 3 - Pó 4	*-3,03667

* denota diferença estatística significativa.

Anexo LXXIII – Comparação múltipla de médias para absorção

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupos Homogeneos
teor 36%	6	4,47833	X
Mistura	6	4,99	X
sete dias	6	5,76833	X
Calcio	6	6,17333	X

Comparação Diferença

Calcio - Mistura	1,18333
Calcio - sete dias	0,405
Calcio - teor 36%	1,695
Mistura - sete dias	-0,778333
Mistura - teor 36%	0,511667
sete dias - teor 36%	1,29

* denota diferença estatística significativa.

Anexo LXXIV – Comparação entre mistura de aditivos e cálcio – inchamento

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey

	N	Média	Grupos Homogeneos
sete dias	6	0,345	X
Calcio	6	0,668333	XX
Mistura	6	0,906667	X
teor 36%	6	0,943333	X

Comparação Diferença

Calcio - Mistura	-0,238333
Calcio - sete dias	0,323333
Calcio - teor 36%	-0,275
Mistura - sete dias	*0,561667
Mistura - teor 36%	-0,036667
sete dias - teor 36%	*-0,598333

* denota diferença estatística significativa.

Anexo LXXV – Comparação múltipla de médias para MOR na compressão

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0%	Tukey		
	N	Média	Grupos Homogeneos

Sete dias	12	97,5	X
Calcio	12	166,525	X
Teor 36%	12	183,817	X
Mistura	12	194,458	X

Comparação	Diferença		

Calcio - Mistura			-27,9333 31,2611
Calcio - Sete dias			*69,025 31,2611
Calcio - Teor 36%			-17,2917 31,2611
Mistura - Sete dias			*96,9583 31,2611
Mistura - Teor 36%			10,6417 31,2611
Sete dias - Teor 36%			*-86,3167 31,2611

* denota estatística significativa.

Anexo LXXVI – Comparação múltipla de médias para MOR na flexão

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0%	Tukey		
	N	Média	Grupos Homogeneos

Sete dias	12	40,85	X
Calcio	12	53,7	X
Mistura	12	66,25	X
Teor 36%	12	74,0417	X

Comparação	Diferença		

Calcio - Mistura			*-12,55
Calcio - Sete dias			*12,85
Calcio - Teor 36%			*-20,3417
Mistura - Sete dias			*25,4
Mistura - Teor 36%			-7,79167
Sete dias - Teor 36%			*-33,1917

* denota diferença estatística significativa.

Anexo LXXVII – Comparação múltipla de médias para Ligação Interna

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey			
	N	Média	Grupos homogêneos
Mistura	18	3,45333	X
Sete dias	18	3,81944	X
Teor 36%	18	5,74111	X
Calcio	18	6,54944	X
Comparação		Diferença	
Calcio - Mistura			*3,09611
Calcio - Sete dias			*2,73
Calcio - Teor 36%			0,808333
Mistura - Sete dias			-0,366111
Mistura - Teor 36%			*-2,28778
Sete dias - Teor 36%			*-1,92167

* denota diferença estatística significativa.

Anexo LXXVIII – Comparação múltipla de médias para MOE na flexão

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0% Tukey			
	N	Média	Grupos Homogeneos
Sete dias	12	23348,2	X
Calcio	12	25535,9	X
Teor 36%	12	30102,6	XX
Mistura	12	32613,1	X
Comparação		Diferença	
Calcio - Mistura			*-7077,16
Calcio - Sete dias			2187,71
Calcio - Teor 36%			-4566,73
Mistura - Sete dias			*9264,87
Mistura - Teor 36%			2510,42
Sete dias - Teor 36%			-6754,44

* denota diferença estatística significativa.

Anexo LXXIX– Comparação múltipla de médias para o MOE na compressão

Comparação múltipla de médias

Metodo: 95,0%	Tukey		
	N	Média	Grupos Homogeneos

Sete dias	12	23105,0	X
Teor 36%	12	27979,0	XX
Calcio	12	31566,9	X
Mistura	12	32400,7	X

Comparação		Diferença	

Calcio - Mistura		-833,833	
Calcio - Sete dias		*8461,86	
Calcio - Teor 36%		3587,92	
Mistura - Sete dias		*9295,69	
Mistura - Teor 36%		4421,75	
Sete dias - Teor 36%		-4873,94	

* denota diferença estatística significativa.